

А. П. Ложников
А. М. Харченко

ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ТРОХОТРОНАХ



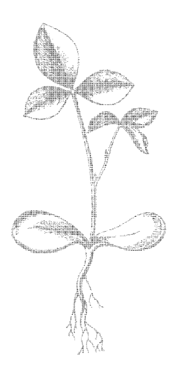
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 495

А. П. ЛОЖНИКОВ и А. М. ХАРЧЕНКО

ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ТРОХОТРОНАХ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.374 324

Л71

В книге рассматриваются принцип действия, конструктивные особенности и параметры линейных, бинарных и кольцевых трохотронов, приводятся способы расчета их режимов по вольт-амперным характеристикам, описываются пересчетные устройства, коммутаторы, делители частоты, амплитудные анализаторы и другие устройства, выполненные на трохотронах.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей, работающих в области импульсной техники.

Ложников Анатолий Петрович, Харченко Анатолий Михайлович.
Импульсные устройства на трохотронах, М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
96 **стр. с илл.** (Массовая радиобиблиотека. Вып. 495).

* * *

Редактор *П. А. Попов* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в пр-во 10/VII 1963 г. Подписано к печати 13/XI 1963 г.
Формат бумаги 84×108[1]/32 4,92 п. л. 6.3 уч.-изд. л.
Т-14831 Тираж 30000 экз. Цена 25 коп. Зак. 388

Типография № 1 Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРОХОТРОНОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях науки и техники все шире применяются электронные импульсные схемы для управления, сигнализации, телеизмерений, выполнения логических операций, переключения цепей и т. п. Создание импульсных схем на обычных приемно-усилительных лампах требует зачастую большого количества ламп, что понижает надежность работы таких схем.

В последние десятилетия создан ряд специальных ламп коммутационного типа, которые предназначены для работы в импульсных схемах и заменяют собой значительное количество обычных ламп. Коммутация в таких лампах осуществляется с помощью электронного луча, что позволяет расширить возможности прибора. Одним из классов электронных коммутационных приборов являются трохотроны — электровакуумные приборы, использующие для переключения лентообразный электронный пучок, формируемый в пересекающихся электрическом и однородном магнитном полях.

Как известно, в постоянном однородном магнитном поле и перпендикулярном ему электрическом поле электроны движутся по трохоидам — отсюда и название приборов «трохотроны».

Использование для формирования пучка пересекающихся электрического и магнитного полей позволяет получать легко управляемый электронный пучок со значительной величиной тока (до десятков миллиампер) при сравнительно небольших (сотни вольт) напряжениях питания. Это выгодно отличает трохотроны от электронно-лучевых приборов с электростатическими системами формирования электронного пучка.

В данной книге будут рассмотрены принципы работы трохотронов разных типов, основные характеристики и параметры трохотронов, а также некоторые применения трохотронов в импульсных схемах. Большинство описанных в книге схем может быть выполнено на выпускаемых в настоящее время отечественной промышленностью типах трохотронов.

2. ТРАЕКТОРИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРОХОТРОНЕ

В однородном магнитном поле электрон, имеющий начальную скорость v, направленную перпендикулярно направлению поля, будет двигаться по окружности, радиус которой r_m зависит от скоро-

сти электрона v и величины магнитного поля (магнитной индукции) B:

$$r_m = k \frac{v}{B}.$$

Эта окружность будет лежать в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля.

Если на однородное магнитное поле наложить электрическое поле E, направленное перпендикулярно магнитному, то центр окружности начнет перемещаться в направлении, перпендикулярном направлению электрического и магнитного полей. Движение электрона по окружности будем называть относительным, а движение центра окружности — переносным.

Анализируя математическое выражение движения электрона в пересекающихся электрическом и магнитном полях, можно пока-

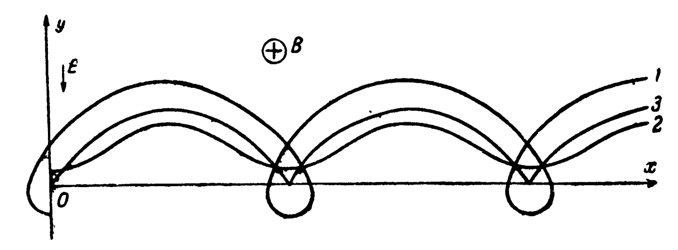


Рис. 1. Различные виды трохоид.

1 — сжатая трохоида; *2* — растянутая трохоида; *3* — циклоида.

зать, что переносное движение электрона направлено вдоль эквипотенциали (поверхности равного потенциала).

Скорость центра окружности $v_{\text{пер}}$ не зависит от начальной скорости электрона и его положения и равна:

$$v_{\text{пер}} = \frac{E}{B}.$$

Если электрическое поле E направлено вдоль оси y, как показано на рис. 1, а магнитное поле B вдоль оси z (перпендикулярно плоскости чертежа, от читателя), то центр окружности, описываемой электроном, перемещается в положительном направлении оси x.

Уравнения траектории электрона имеют следующий вид:

$$x = -\frac{E}{B} t + A \sin \frac{eB}{m} t;$$

$$y = C - A \cos \frac{eB}{m} t,$$

где e — заряд электрона;
m — масса электрона;
A и C — постоянные, зависящие от начальной скорости и положения электрона.

Кривая, описываемая этими уравнениями, называется трохоидой. Ее можно представить как траекторию какой-либо из точек катящегося колеса. Постоянная A представляет собой расстояние от центра колеса до рассматриваемой точки.

Вид трохоиды зависит от соотношения между начальной (относительной) и переносной скоростями электронов.

При $A > \frac{mE}{eB^2}$, что соответствует $v_{\text{отн}} > v_{\text{пер}}$, получается сжатая трохоида (кривая *1* на рис. 1).

При $A < \frac{mE}{eB^2}$, что соответствует $v_{\text{отн}} < v_{\text{пер}}$, получается растянутая трохоида (кривая *2* на рис. 1).

При $A = \frac{mE}{eB^2}$, что соответствует $v_{\text{отн}} = v_{\text{пер}}$, получается циклоида (кривая *3* на рис. 1).

При $A=0$ трохоида превращается в прямую.

В реальном пучке электроны могут иметь различные начальные скорости, в связи с чем они будут двигаться по трохоидам, несколько отличным друг от друга.

Замечательным свойством трохоидального пучка является то, что он в однородном или плавно изменяющемся (в пространстве) электрическом поле движется вдоль эквипотенциальной линии (поверхности). Это свойство позволяет, изменяя форму и направление эквипотенциальных линий, направлять электронный трохоидальный пучок по желаемому пути к заданному электроду.

3. РАБОТА ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ ТРОХОТРОНА

Устройство трохотронов и переключение пучка в трохотроне можно уяснить, рассматривая работу простейшей ячейки трохотрона. На рис. 2 показано поперечное сечение элементарной ячейки трохотрона. Электроды имеют протяженность в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа.

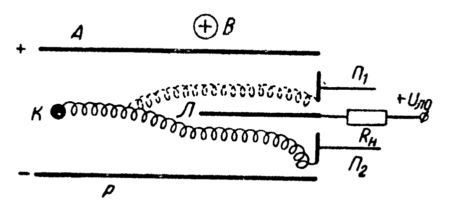


Рис. 2. Поперечное сечение элементарной ячейки трохотрона.

А — анод; *Р* — рельс; *К* — катод; $П_1$ и $П_2$ — выходные электроды (пластины); *Л* — переключающий электрод (лопатка).

Между плоскими электродами — анодом *А*, имеющим положительный потенциал, и так называемым «рельсом» *Р*, имеющим отрицательный потенциал, расположен цилиндрический катод *К* (потенциалы измеряются относительно катода). В пространстве между анодом и рельсом создается с помощью магнита постоянное одно-

родное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости чертежа. Как было сказано выше, эмиттируемые катодом электроны в скрещенных магнитном и электрическом полях движутся по трохоидам, направляющими которых служат эквипотенциальные линии электрического поля. В нашем случае направляющей будет служить эквипотенциаль, которая соответствует потенциалу, несколько большему (более положительному), чем потенциал катода.

Условно можно принять потенциал направляющей равным нулю. Поскольку траектории электронов аналогичны траекториям точек колеса, катящегося вдоль нулевой или отрицательной эквипотенциали, отрицательный электрод назван рельсом.

Положение нулевой эквипотенциальной поверхности в правой части ячейки (на рис. 2) можно изменять, регулируя потенциал переключающего электрода—лопатки *Л*. Последняя расположена в правой части ячейки и делит ее на две камеры: верхнюю и нижнюю.

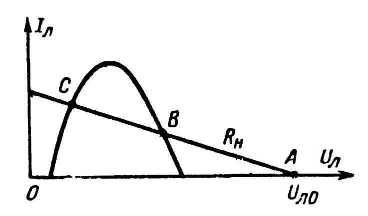


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика переключающего электрода (лопатки).

Если потенциал лопатки положителен ($U_л>0$), то нулевая эквипотенциальная поверхность пройдет ниже лопатки и весь электронный пучок направится в нижнюю камеру, где попадает на положительный электрод-пластину $П_2$ (эквипотенциали сходятся в узком пространстве между пластиной и рельсом, а электроны в основном идут на электрод с положительным потенциалом). Если же потенциал лопатки отрицателен ($U_л<0$), то нулевая эквипотенциальная поверхность пройдет уже над лопаткой и, пучок попадет в верхнюю камеру на пластину $П_1$.

Таким образом, изменяя потенциал лопатки, можно переключать пучок из одной камеры в другую.

Рассмотрим зависимость тока на лопатку в элементарной ячейке (рис. 2) от потенциала лопатки. Эта вольт-амперная характеристика, показанная на рис. 3, имеет колоколообразный вид. При больших положительных потенциалах ток пучка на лопатку равен нулю: пучок проходит под лопаткой. При некотором положительном потенциале, близком к потенциалу катода, ток пучка начинает попадать на лопатку и достигает максимальной величины при потенциале, который можно принять за потенциал пучка (эквипотенциаль, по которой следует пучок).

При потенциале лопатки, равном или меньшем, чем потенциал катода, ток на лопатку отсутствует: пучок полностью проходит над лопаткой.

Если включить в цепь лопатки нагрузочное сопротивление $R_н$ и подключить эту цепь к положительному потенциалу $U_{л0}$, то могут быть получены два устойчивых и одно неустойчивое состояние ячейки трохотрона. Устойчивые состояния будут соответствовать точкам *A* и *C* пересечения нагрузочной прямой ($R_н$ на рис. 3) и вольт-амперной характеристики лопатки. Точка *B* определяет неустойчивое состояние ячейки; из него ячейка трохотрона переходит самопроизвольно в состояние устойчивого равновесия, соответствующее либо точке *A*, либо точке *C*.

Таким образом, элементарная ячейка трохотрона с сопротивлением, включенным в цепь лопатки, имеет два устойчивых состояния: *С* (пучок в основном проходит над лопаткой, малая часть его попадает на лопатку) и *А* (пучок проходит под лопаткой). Одно состояние ячейки, определяемое положением пучка, отличается от другого величиной напряжения на лопатке. Поэтому при наличии в цепи

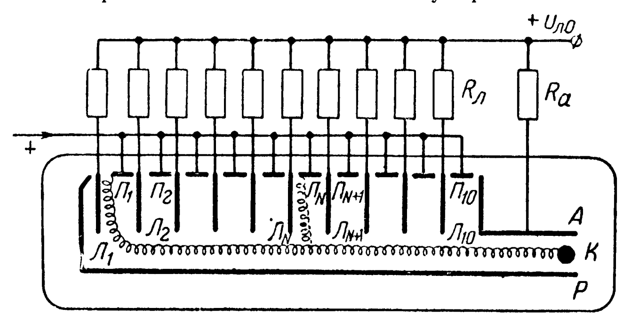


Рис. 4. Линейный десятикамерный трохотрон.
К — катод; *А* — анод; *Р* — рельс; *П* — пластины; *Л* — лопатки

лопатки сопротивления $R_н$ определенной величины каждое из устойчивых состояний может быть получено без изменения напряжения питания лопатки $U_{л0}$.

4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТРОХОТРОНОВ

Различные типы трохотронов получаются путем соответствующих комбинаций как самих элементарных ячеек, так и электродов, образующих элементарную ячейку.

Линейный трохотрон. Поперечное сечение линейного десятикамерного трохотрона показано на рис. 4. Однородное магнитное поле (порядка нескольких сотых тесла) направлено перпендикулярно плоскости рисунка. Катод *К* может быть нитью или цилиндром. Вблизи катода находится анод *А*. Рельс *Р* имеет нулевой или небольшой отрицательный потенциал относительно катода. Электрическое поле создается между рельсом и остальными (положительными) электродами, которых имеются два вида: длинные лопатообразные электроды *Л*, называемые лопатками, и небольшие электроды *П*, называемые пластинами. Лопатки образуют в трохотроне десять ячеек (камер). В каждой из ячеек расположена своя пластина. Все эти электроды обычно имеют положительный относительно катода потенциал. Лопатка $Л_1$ иногда бывает связана с рельсом.

Электроны, эмиттируемые катодом, под воздействием пересекающихся магнитного и электрического полей образуют лентообразный трохоидальный пучок. Этот пучок формируется в прикатодной области и далее следует приблизительно по эквипотенциали между рельсом и лопатками вдоль всего прибора. В конце прибора эквипотенциаль проходит в узкий зазор между первой лопаткой и первой пластиной. Когда трохоидальный пучок достигает этого пространства,

то электроны идут на пластину $П_1$. Необходимо отметить, что практически весь ток (более 99,9%), эмиттированный с катода, может попасть на первую пластину, несмотря на то, что пучок на своем сравнительно длинном пути проходит вблизи электродов (лопаток), имеющих положительный потенциал.

Если напряжение на какой-либо лопатке, например $Л_N$ понижать, то на нее начнет попадать часть пучка. В цепи лопатки потечет ток, достигающий максимума при потенциале лопатки, примерно равном эквипотенциали, вдоль которой следует пучок. При дальнейшем понижении потенциала лопатки ток на лопатку падает до нуля. В результате понижения потенциала лопатки $Л_N$ пучок переключается из первой ячейки в N-ю, что видно из характеристик на рис. 5, где показаны токи первой и N-й пластин $П_1$ и $П_N$ и ток в цепи N-й лопатки в зависимости от напряжения на ней. Таким образом, N-я лопатка действует как переключатель, который заставляет пучок идти либо на пластину $П_N$, либо на пластину $П_1$ Если в цепь лопатки включить сопротивление, то будут иметь место, как уже отмечалось ранее, два устойчивых состояния (точка A и точка C на рис. 5). В точке A лопатка $Л_N$ имеет высокий потенциал, и весь пучок проходит в первую ячейку.

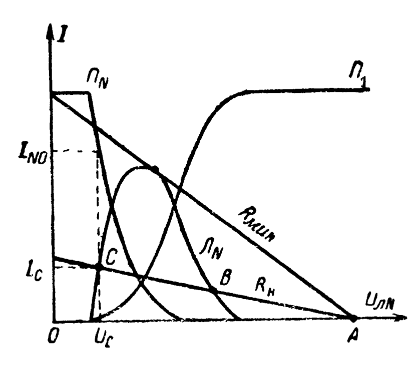


Рис. 5. Зависимости токов на первую пластину $П_1$, N-ю пластину $П_N$ и N-ю лопатку $Л_N$ от напряжения на N-й лопатке при неизменном положительном потенциале на остальных электродах.

В точке C эта же лопатка имеет низкий потенциал, который поддерживается током I_C той части пучка, которая попадает на лопатку. Основная часть пучка, равная I_{N0}, попадает в N-ю ячейку на пластину $П_N$. Из сказанного видно, что в линейном трохотроне каждая из лопаток может быть использована как самоблокирующийся переключательный элемент.

Двумерный трохотрон. Поперечное сечение двумерного трохотрона схематически изображено на рис. 6. Прибор имеет несколько (на данном рисунке две — *I* и *II*) длинных вертикальных лопаток, на которых набрано по пять ячеек, разделенных горизонтальными лопатками меньшей длины. Горизонтальные лопатки объединены в группы (ряды *1*, *2*, *3*, *4*, *5*). Если обе большие вертикальные лопатки и горизонтальные ряды меньших лопаток имеют положительный потенциал, то пучок проходит вдоль рельса в дальний конец прибора. Если надо луч переключить, например, на пластину *13*, то снижают напряжение на вертикальной лопатке *1* и на лопатках горизонтального ряда *3*, вследствие чего луч и попадает в ячейку *13*, как показано на рис. 6.

Бинарный трохотрон. Ячейки в этом трохотроне (рис. 7) образуются тремя видами лопаток: одной длинной, двумя средними и четырьмя короткими. Изменяя напряжения на этих трех группах

лопаток, пучок можно направить в любую из восьми ячеек и соответственно на любую из восьми пластин. Так, например, если все лопатки отрицательны, то пучок попадает на восьмую пластину, как показано на рис. 7. Если короткие лопатки положительны, а остальные отрицательны, то пучок попадет на седьмую пластину, и т. п.

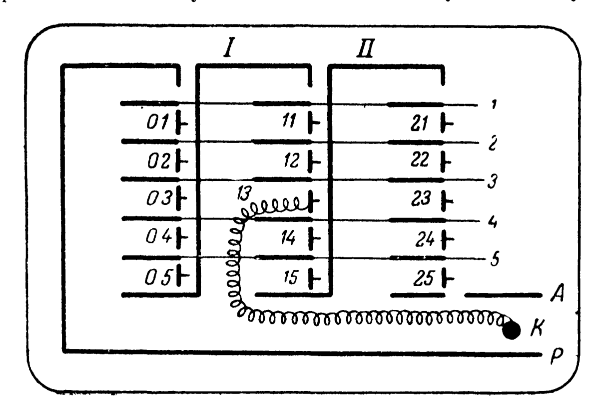


Рис. 6. Схема двумерного трохотрона.

Кольцевой трохотрон. Поперечное сечение этого трохотрона схематически изображено на рис. 8. В отличие от рассмотренных выше в нем отсутствуют анод и рельс. Трохоидальный пучок формируется в области между катодом и лопатками. Ячейки образуются лопатками, расположенными симметрично вокруг катода. В каждой из ячеек (камер) находится пластина. Понижая потенциал той или иной лопатки, пучок можно направить в соответствующую камеру трохотрона.

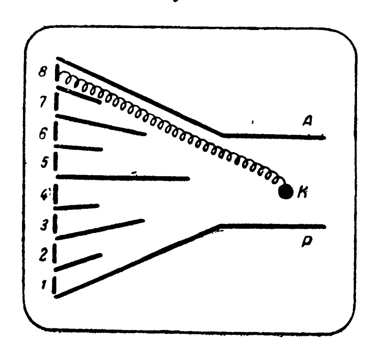


Рис. 7. Схема бинарного трохотрона.

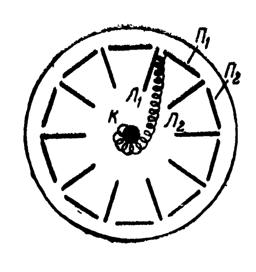


Рис. 8. Схема кольцевого трохотрона.

Переключающие функции трохотронов можно пояснить на примере схем с релейными контактами, выполняющих те же функции,

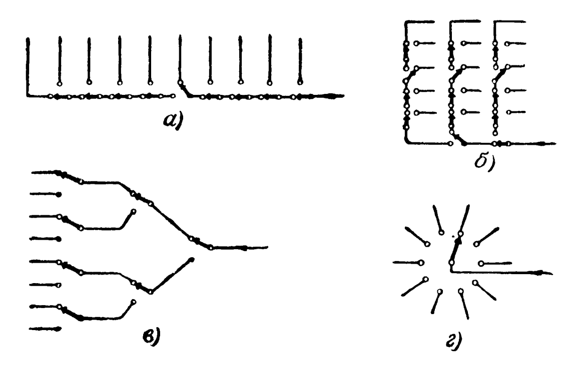


Рис. 9. Эквивалентные схемы трохотронов.

что и трохотроны. На рис. 9 даны такие эквивалентные схемы для линейного трохотрона с десятью ячейками (рис. 9,*а*), для двумерного трохотрона (рис. 9,*б*), для бинарного трохотрона (рис. 9,*в*) и для кольцевого трохотрона (рис. 9,*г*).

Кроме названных здесь основных типов трохотронов, имеется ряд других специальных типов.

5. ЛИНЕЙНЫЙ ТРОХОТРОН

Как было показано выше, нормальная работа ячейки линейного трохотрона (наличие двух устойчивых состояний) возможна только в том случае, если сопротивление в цепи лопатки $Л_N$ выбрано таким образом, что нагрузочная прямая $R_н$ (см. рис. 5) пересекает вольт-амперную характеристику лопатки в трех точках (*A*, *B* и *C*). При этом возможны два устойчивых равновесных состояния: отсутствие тока в данной камере (точка *A*) и блокировка пучка в камере (точка *C*). Если же сопротивление $R_л$ в цепи лопатки выбрано так, что нагрузочная прямая касается вольт-амперной характеристики лопатки в одной точке, то это будет то минимальное сопротивление $R_{мин}$, при котором еще возможна нормальная работа прибора (блокировка пучка в камере). При уменьшении сопротивления в цепи лопатки ниже величины $R_{мин}$ пучок не будет блокироваться в данной камере. Хотя при понижении потенциала лопатки до нуля пучок и попадет в данную камеру, он после снятия принудительного нулевого потенциала выйдет из нее и пройдет мимо. Другими словами, остается только одно устойчивое состояние, характеризуемое точкой *A* (луч проходит мимо камеры).

Максимально допустимое сопротивление в цепи лопатки определяется из рассмотрения вольт-амперной характеристики лопатки $Л_{N+1}$, снятой для случая, когда лопатка $Л_N$ находится под нулевым потенциалом, точнее под потенциалом, соответствующим рабочей точке *C*. Эта характеристика (кривая *II* на рис. 10) соответствует переходу луча из *N*-й камеры в камеру $N+1$. Она отличается от характеристики этой же лопатки, снятой при положительном потенциале *N*-й лопатки (кривая *I* на рис. 10). Точки *A* и *C* на кривой *II* соответствуют устойчивому, а точка *B* неустойчивому состоя-

нию. При увеличении сопротивления может наступить такой режим, когда точки A и B совпадут; прямая будет касаться характеристики лопатки в одной точке $B'A'$ и пересекать ее в точке C. Величина сопротивления, соответствующая этому режиму, будет максимально допустимой величиной сопротивления в цепи лопатки $R_{\text{макс}}$. При сопротивлении в цепи лопатки $R_{\text{л}} > R_{\text{макс}}$ пучок будет самопроизвольно переключаться из камеры в камеру.

Таким образом, для нормальной работы трохотрона нужно выбирать величину сопротивлений в цепях лопаток в определенных пределах:

$$R_{\text{мин}} < R_{\text{л}} < R_{\text{макс}}.$$

Рассмотрим, как влияет изменение напряжения источника питания лопаток $U_{\text{л}0}$ на режим работы прибора. При изменении напряжения питания лопаток в линейном трохотроне вольт-амперные характеристики лопаток практически не изменяются, поскольку формирование трохоидального пучка происходит в основном в области между анодом и рельсом.

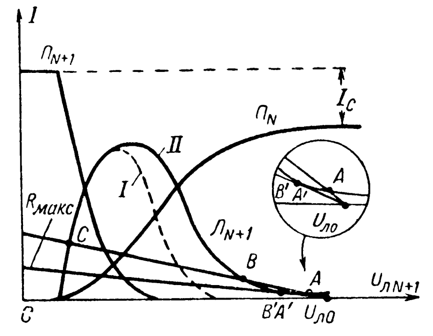


Рис. 10. Зависимость токов на N-ю пластину $П_N$, $N+1$-ю пластину $П_{N+1}$ и $N+1$-ю лопатку $Л_{N+1}$ от напряжения на $N+1$-й лопатке.

Потенциал лопатки N равен U_C (см. рис. 5), все остальные пластины и лопатки имеют положительный потенциал. Штриховая кривая I — вольт-амперная характеристика лопатки $N+1$ при положительном потенциале лопатки N.

Изменение напряжения источника питания лопатки изменяет только положение (но не угол наклона!) нагрузочной прямой. Увеличение напряжения сдвигает нагрузочную прямую вправо, а уменьшение напряжения — влево. При увеличении напряжения $U_{\text{л}0}$ может наступить режим, когда нагрузочная прямая будет только касаться в одной точке характеристики I лопатки (рис. 10). Это верхний предел напряжения $U_{\text{л в}}$. При более высоком напряжении источника пучок не сможет блокироваться в данной камере.

Уменьшение напряжения лопаток ниже величины $U_{\text{л н}}$, при которой нагрузочная прямая касается правой части вольт-амперной характеристики (кривая II на рис. 10), приводит к режиму самопереключения пучка в трохотроне.

Таким образом, напряжение источника питания лопаток $U_{\text{л}0}$ должно лежать в определенных пределах:

$$U_{\text{л.н}} < U_{\text{л}0} < U_{\text{л в}}.$$

Рассмотрим теперь, как производится переключение пучка в приборе. Мы знаем, что пучок можно направлять в ту или иную камеру и переключать из камеры в камеру понижением потенциала на ло-

патке соответствующей камеры. Но есть и другой, широко применяемый на практике способ переключения пучка. Если в цепь каждой лопатки включить правильно выбранное (см. выше) сопротивление нагрузки, то последовательные переключения пучка из камеры в камеру можно осуществить понижением потенциала пластин.

Предположим, что пучок заблокирован в N-й камере. Потенциал лопатки $Л_N$ близок к нулю. Если N-я пластина имеет положительный потенциал, то вольт-амперная характеристика лопатки $Л_{N+1}$ будет обычной (кривая II на рис. 10). Состояние ячейки соответствует точке A этой кривой. Если потенциал N-й пластины понижать, то правая часть характеристики будет подниматься и при определен-

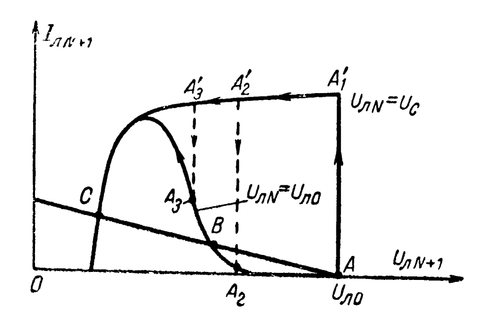


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики лопатки $N+1$ для различных напряжений предыдущей лопатки $Л_N$.

Предыдущая пластина имеет потенциал ниже потенциала переброса, рельс находится под отрицательным потенциалом, все другие электроды положительны.

ном потенциале ($U_{л\,N}=U_C$) займет положение $CA'_3A'_2A'_1$, показанное на рис. 11.

Очевидно, при понижении потенциала N-й пластины ток лопатки $Л_{N+1}$ возрастает (рабочая точка переходит из положения A в A'_1). Этот ток начинает заряжать паразитные емкости, включенные параллельно сопротивлению в цепи лопатки $Л_{N+1}$.В результате напряжение на лопатке постепенно уменьшается и рабочая точка перемещается по характеристике в направлении от A'_1 к A'_2. Так как лопатка $Л_{N+1}$ перехватывает пучок на себя, то та часть пучка, которая проходит в N-ю камеру, начинает уменьшаться. Это приводит к уменьшению тока блокирующей лопатки $Л_N$, которая в конце концов отпускает пучок.

Дальнейший ход процесса зависит от того, на каком участке верхней характеристики (рис. 11) находится рабочая точка в момент отпускания пучка лопаткой $Л_N$. Дело в том, что после отпускания пучка лопаткой $Л_N$ вольт-амперная характеристика лопатки ($N+1$) принимает вид нижней кривой CA_3BA_2A на рис. 11, соответствующей кривой I на рис. 10. Соответственно рабочая точка с верхней кривой перемещается («падает») на нижнюю.

Если рабочая точка попадает на участок нижней кривой, расположенный правее точки неустойчивого равновесия B, то переключе-

ния пучка из N-й в $(N+1)$-ю камеру не происходит. Система возвращается в начальное состояние A. Если же к моменту отпускания точка успевает переместиться достаточно далеко по верхней кривой и попадает на нижнюю левее точки B, то система переходит в устойчивое состояние. Пучок при этом перейдет в камеру $N+1$, где его заблокирует лопатка $Л_{N+1}$.

Чтобы N-я лопатка дольше не отпускала пучок (давая возможность рабочей точке переместиться по верхней характеристике влево), минимальную величину сопротивления в цепи лопатки следует несколько увеличить по сравнению с найденной ранее из условия касания величиной $R_{мин}$ (см. рис. 5).

Итак, понижением потенциала пластины можно переключить пучок из одной камеры в другую. Переключение можно осуществить, подав на пластину отрицательный импульс достаточной длительности (не менее времени, необходимого, чтобы рабочая точка следующей лопатки переместилась левее точки неустойчивого равновесия B).

Если отрицательные импульсы переброса подавать одновременно на все пластины, соединенные вместе, то для правильного переключения пучка (от каждого импульса только в следующую камеру) необходимо выдержать жесткие требования к длительности импульса $\tau_{имп}$. Прежде всего, длительность импульса должна быть не менее времени переброса. Но в случае большой длительности импульса может произойти двойной переброс, т. е. переключение пучка через две камеры. Чтобы этого не случилось, длительность импульса должна быть менее удвоенного времени переброса.

Рассмотренные процессы позволяют создать простейшую пересчетную схему. В такой схеме пучок каждым из поступающих импульсов будет переключаться из камеры в камеру от первого положения до десятого. Наличие пучка в камере можно фиксировать по напряжению на лопатке. В той камере, где находится пучок, напряжение будет равно нулю. Затем особым устройством пучок возвращается из десятой камеры в первую и вновь начинает движение.

Рассмотрим процесс возврата пучка из десятой камеры в первую. Для переключения пучка из десятой камеры в первую достаточно при поступлении очередного импульса, когда луч находится на десятой пластине, особым устройством гасить пучок, т. е. уменьшать ток пучка до величины, при которой невозможна блокировка его в десятой камере. Практически для переброса пучка из десятой камеры в первую нужно включить в цепь анода сопротивление $R_а$ (см. рис. 4).

При поступлении очередного отрицательного импульса на пластины, когда пучок находится в десятой камере, пучок сталкивается с десятой пластины и попадает на анод. Потенциал анода понижается и ток пучка уменьшается.

Вольт-амперная характеристика десятой лопатки понижается до тех пор, пока не станет касаться прямой сопротивления $R_{л10}$, как показано на рис. 12 (штриховой линией на этом рисунке изображена характеристика десятой лопатки при напряжении анода $U_{л0}$, т. е. при отсутствии анодного тока). После этого десятая лопатка имеет только одну устойчивую точку при напряжении $U_{л0}$, потенциал лопатки $Л_{10}$ стремится к величине $U_{л0}$ и пучок проходит в первую камеру, если на всех других лопатках потенциал равен $U_{л0}$.

Потенциал анода, при котором десятая лопатка перестает блокировать пучок, называется критическим потенциалом анода $U_{а.кр}$.

Необходимую величину сопротивления в цепи анода можно определить, зная критический потенциал и ток $I_{а\,кр}$, попадающий при этом на анод. После того как десятая лопатка отпустит пучок, прекратится ток на анод и потенциал анода начнет восстанавливаться (возрастать до $U_{л0}$). Чтобы пучок не мог вновь заблокироваться в десятой камере, необходимо, чтобы потенциал лопатки $Л_{10}$ восстанавливался быстрее, чем потенциал анода. Это достигается тем, что в цепь анода включают сопротивление, в 2—4 раза большее, чем в цепи лопаток, и, кроме того, в цепи десятой лопатки уменьшают сопротивление $R_{л10}$. Так, например, если $R_л=360$ *ком*, то $R_а=1,1$ *Мом* и $R_{л10}=150$ *ком*.

При переходе пучка из десятого положения в первое на аноде получается отрицательный импульс. Значит, прибор можно использо-

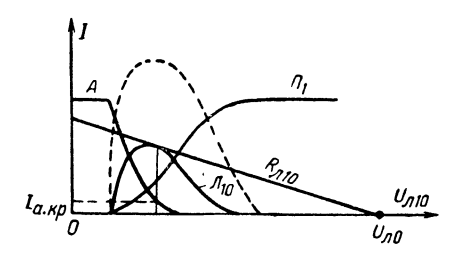


Рис. 12. Зависимость токов на первую пластину $П_1$, десятую лопатку $Л_{10}$ и анод от напряжения на десятой лопатке. Напряжение анода понижено до критического $U_{а.кр}$.

вать для пересчета (деления числа импульсов) на десять. Выходным импульсом пересчетной декады будет импульс с анодного сопротивления. Наличие пучка в камере можно фиксировать по напряжению на сопротивлении в цепи лопатки, включая в цепь каждой лопатки неоновую индикаторную лампочку.

Описанная схема пересчета, в которой импульсы поступают на соединенные вместе пластины всех камер, требует хорошо сформированных по длительности и амплитуде импульсов. Надежность работы этой схемы невелика. Для повышения надежности работы необходимо, чтобы потенциал пластины той камеры, куда попадает пучок, был положительным и превышал потенциал переброса пучка.

Одной из схем, обеспечивающих эти условия, является схема с цепочками RC в пластинах (рис. 13). В цепь каждой из пластин включается параллельная цепочка $R_п C_п$. Эти цепочки соединяются в одну цепь, куда и подаются входные отрицательные импульсы. Если пучок находится в какой-либо камере (например, в камере N), то ток пучка, попадающий на пластину, создает на сопротивлении $R_п$ падение напряжения. Потенциал пластины понижается, но недостаточно для переброса пучка в камеру $N+1$. Очередной отрица-

тельный импульс понижает потенциал N-й пластины до величины, обеспечивающей переброс пучка (ниже потенциала переброса $U_{пер}$). Пучок переключается в $(N+1)$-ю камеру. Поскольку потенциал пластины этой камеры высок и мгновенно понизиться не может из-за наличия емкости $C_п$, то пучок остается в камере $N+1$, даже если входной импульс и не прекратится к окончанию переброса. Все это упрощает требования к длительности входных импульсов.

Если в схеме с цепочками $R_пC_п$ уменьшить напряжение питания или увеличить сопротивление пластины $R_п$ до такой величины, чтобы потенциал ее мог опускаться ниже потенциала переброса даже при отсутствии внешних импульсов, то пучок будет самостоятельно переключаться из камеры в камеру без подачи внешних импульсов. Он будет находиться в каждой камере в течение времени, необходимого для достижения пластиной потенциала переброса Это время будет зависеть от параметров схемы и напряжения питания пластин. Наличие такой зависимости позволяет довольно просто осуществить

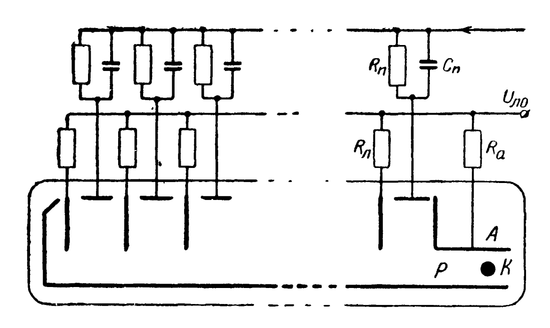


Рис. 13. Переключающая схема с цепочками RC в цепях пластин.

способ время-импульсной модуляции (подробнее см. в гл. 2). Если напряжение питания пластин выбрать ниже напряжения переключения, то параметры цепочки $R_пC_п$ не влияют на переключение пучка и он будет быстро переходить из камеры в камеру, оставаясь на каждой из лопаток только несколько микросекунд (в форсированных режимах еще меньше).

Для надежной работы на больших частотах нужны другие схемы. Одним из способов повышения надежности и быстродействия является соединение пластин не в одну, а в две группы (четную и нечетную), как показано на рис. 14. Каждая из групп пластин трохотрона присоединяется к одному из анодов обычного триггера, запускаемого входными импульсами. Пучок может оставаться стабильно в той камере, где пластина положительна. При подаче на вход триггера входного импульса триггер опрокидывается, изменяя напряжение пластин (потенциал одной группы пластин понижается, а другой — повышается). Пучок при этом переходит в следующую камеру и, так как пластина этой камеры становится положительной, остается там. Таким образом достигается большая надежность работы схемы.

В данной схеме нет необходимости, чтобы напряжения пластин изменялись очень резко. Переключение может быть осуществлено даже синусоидальным напряжением, подаваемым в противофазе на обе группы пластин. Единственным необходимым условием является то, что потенциалы обеих групп пластин никогда не должны одновременно падать ниже величины напряжения переключения $U_{пер}$ (рис. 15).

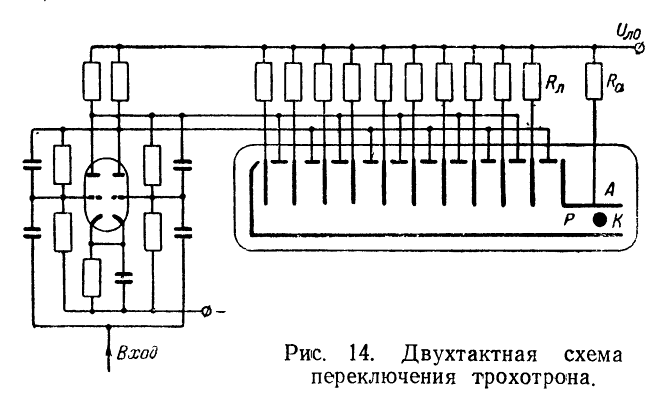


Рис. 14. Двухтактная схема переключения трохотрона.

При конструировании промышленного образца отечественного линейного трохотрона основное внимание уделялось получению малого времени переброса пучка лопаткой. Для обеспечения этого прибор должен иметь малые внутренние емкости и большой ток пучка при малых напряжениях питания.

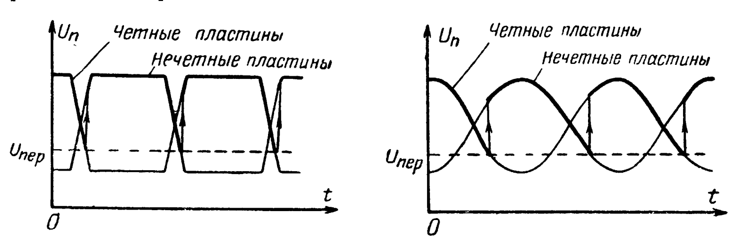


Рис. 15. Графики изменения управляющего напряжения на пластинах.

Жирной линией отмечены цепи, по которым течет ток пучка.

Основным параметром трохотрона является расстояние между рельсом и анодом, равное также расстоянию между рельсом и концами лопаток и между соседними лопатками. Это расстояние называется шириной канала. В отечественном промышленном образце ширина канала выбрана равной 2 *мм*. Хотя при таком выборе увеличиваются технологические трудности, но это позволяет уменьшить габариты прибора и, следовательно, внутренние емкости.

Рассмотрим конструкцию линейного трохотрона, схематически изображенную на рис. 16. Как видно из рисунка, камеры расположены последовательно друг за другом, но не на прямой линии, а согнуты в кольцо, так что рельс *P* имеет вид цилиндра с примыкающей радиальной частью, закрывающей канал трохотрона. Радиус рельса (3,5 *мм*) выбран из соображения целесообразного использования всего объема прибора. Рельс имеет боковые стенки для того, чтобы исключить расползание электронного пучка вдоль магнитного поля.

Анод *A* выбран длиной 10 *мм*. Участок анода в направлении движения пучка должен быть достаточным, чтобы обеспечить область формирования пучка независимо от потенциалов последующих электродов (лопаток). Участок анода в противоположном направлении вместе с рельсом предохраняет область формирования пучка от влияния паразитных полей, могущих возникнуть в приборе.

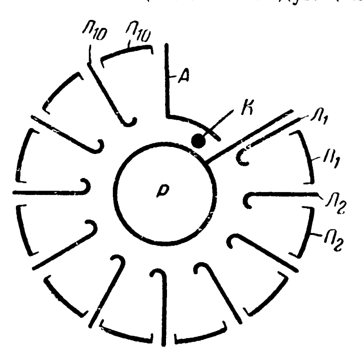


Рис. 16. Схема поперечного сечения линейного трохотрона цилиндрической конструкции.
K — катод; *A* — анод; *P* — рельс; *Л* — лопатка; *П* — пластина.

От лопатки *Л* требуется полный переброс пучка из одной камеры в другую. Длина лопатки не должна быть очень велика, чтобы сильно не увеличить емкость, но в то же время должна обеспечить достаточную глубину камеры, чтобы поле пластин не влияло на трохоидальный пучок, идущий вдоль канала. На концах лопаток со стороны канала имеются закругления (радиусом 0,5 *мм*), направленные в сторону анода. Они необходимы для сглаживания сильных неоднородностей поля у концов лопаток в канале и тем самым для уменьшения токов утечки на лопатки, расположенные вдоль пути пучка. Для предотвращения расталкивания пучка в направлении магнитного поля лопатки, как и рельс, имеют отогнутые боковые стенки.

Пластины *П* выполняют две функции: во-первых, они являются приемниками электронов после окончания переброса пучка и, во-вторых, отклоняют пучок на лопатку при подаче на них отрицательного импульса напряжения. Ширина пластин (4,5 *мм*) выбрана такой, чтобы заполнить все расстояние между лопатками по внешней окружности. Края пластин загнуты для увеличения области неоднородного поля, что облегчает процесс отклонения пучка на лопатку при переключении.

Длина всех электродов в направлении магнитного поля (12 *мм*) выбрана из соображений получения достаточной величины тока в пучке при достаточной механической прочности катода и всей системы электродов, а также с учетом приемлемой величины зазора между полюсами постоянного магнита. Цилиндрическое расположение электродов позволяет при использовании баллона и конструкции лампы типа «желудь» значительно уменьшить длину выводов внутри колбы, что в свою очередь ведет к уменьшению внутренних емко-

стей прибора. Другим преимуществом цилиндрической конструкции является относительно большой размер пластин, что позволяет значительно увеличить допустимую мощность рассеяния на пластинах, а это весьма существенно при малых размерах прибора. Наконец, при использовании конструкции типа «желудь» стенки колбы могут подходить к монтажу значительно ближе, чем при других конструкциях, что позволяет уменьшить размеры зазора постоянного магнита при тех же самых размерах самого трохотрона Эти преимущества и определили цилиндрическую конструкцию промышленных образцов линейного десятикамерного трохотрона.

Приводим основные электрические параметры отечественного десятикамерного трохотрона типа ЛП-4: напряжение накала 4 *в*; напряжение анода 150 *в*; напряжение рельса минус 70 *в*; напряжение лопаток и пластин 85 *в*; напряженность магнитного поля $2{,}56 \cdot 10^4$ *а/м*; ток катода 2 *ма* (устанавливается регулировкой анодного напряжения); ток каждой пластины не менее 1 *ма.*

Поскольку прибор поставляется без магнитной системы, то после сборки его с магнитной системой желательно произвести подъюстировку и проверку его нормальной работы. Для этого включаются накал и питание всех электродов. Потенциалом анода устанавливается ток пучка (при включенном анодном сопротивлении $R_а$). При замыкании накоротко сопротивления $R_а$, если утечки на анод отсутствуют, ток луча не должен изменяться. При неправильном (противоположном) направлении магнитного поля весь ток идет на анод (пучок движется в обратную сторону). Затем при определенном потенциале рельса повышают потенциал лопаток и пластин до тех пор, пока пучок не попадет на наиболее удаленную от анода пластину (при больших токах утечек на лопатки желательно замкнуть накоротко сопротивления в цепях лопаток). По наилучшему прохождению тока пучка на эту пластину и может быть произведена подъюстировка магнитного поля. После этого на пластины при включенных рабочих сопротивлениях $R_л$ поочередно задаются нулевые потенциалы и луч последовательно переходит из камеры в камеры, о чем можно судить по изменению тока в цепи пластины или по изменению напряжения на соответствующей лопатке. При нормальной работе прибора пучок проходит по всем камерам, а затем возвращается в исходную первую камеру. Для установления рабочих областей прибора можно при различных потенциалах рельса установить пределы изменения потенциалов лопаток, внутри которых происходит нормальная работа прибора.

Необходимо отметить, что пучок, перемещаясь по каналу, претерпевает некоторые изменения: 1) он расширяется; 2) появляются токи на электроды, имеющие отрицательный относительно катода потенциал; 3) в пучке возникают колебания плотности тока, вызывающие шум.

Наиболее важное значение имеет расползание пучка, потому что оно приводит к увеличению токов утечки на положительные электроды и к расширению (по напряжению) и понижению (по току) характеристик лопаток, наиболее удаленных от катода, что сужает диапазон возможных изменений параметров схемы с трохотроном.

Появление тока на отрицательные электроды (например, рельс) важно лишь с точки зрения уменьшения тока пучка. Шумы, возникающие в приборе, важны в тех случаях, когда пучок используется как носитель информации, например в телефонии.

6. БИНАРНЫЙ ТРОХОТРОН

Поперечное сечение промышленного образца бинарного трохотрона типа ЛП-5 на три входа и восемь выходов показано на рис. 17. Область формирования пучка в бинарном трохотроне несколько отличается от области формирования линейного трохотрона. В бинарном трохотроне для ограничения эмиссии с боковых и тыльной сторон катода последний помещен в углубление, выполненное в рельсе. Для уменьшения токов утечки на анод и для возможности изменения положения пучка в канале рельс и анод состоят каждый из двух раздельных электродов. Кроме того, предусмотрены два боковых электрода, имеющих потенциал рельса, для предотвращения расширения пучка в направлении магнитного поля.

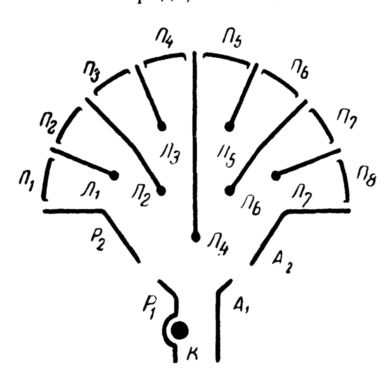


Рис. 17. Схема поперечного сечения бинарного трохотрона.

$К$ — катод; $А_1$ и $А_2$ — аноды, $Р_1$ и $Р_2$ — рельсы; $Л_1$, $Л_3$, $Л_5$ и $Л_7$—лопатки I короткой группы; $Л_2$ и $Л_6$ — лопатки II средней группы; $Л_4$ — лопатка III длинной группы; $П_1$, $П_2$, .. , $П_8$ — пластины.

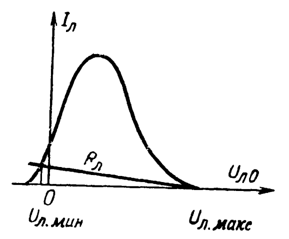


Рис. 18. Вольт-амперная характеристика лопатки бинарного трохотрона.

Размеры и форма трех групп лопаток выбраны из соображений наименьшего взаимного влияния полей одной группы на поля другой. На концах лопаток имеются закругления для уменьшения тока утечек на острые края. Приемные пластины имеют такую же конструкцию, как и в линейном трохотроне.

Бинарный трохотрон работает, как правило, в режиме без самоблокировки пучка в данной камере. Переключение пучка осуществляется путем изменения потенциалов лопаток. В связи с этим для работы бинарного трохотрона основную роль играет ширина (по напряжению), а не высота (по току) вольт-амперных характеристик лопаток. Так, например, для характеристики лопатки, приведенной на рис. 18, важно найти величины $U_{л.\,макс}$ и $U_{л.\,мин}$, которые определяют наименьший перепад напряжений на лопатках, обеспечивающий нормальную работу бинарного трохотрона. Экспериментально эти величины можно определить следующим образом.

На группы лопаток задаются потенциалы в такой комбинации, чтобы пучок проходил вдоль рассматриваемой лопатки, в цепь которой включается сопротивление $R_л$ в несколько сотен килоом. Напряжение питания рассматриваемой лопатки понижают до тех пор, пока не происходит самопереключение пучка в соседнее положение.

Это напряжение питания лопатки и будет величиной $U_{л.\ макс}$. После самопереключения потенциал лопатки понизится до величины $U_{л.\ мин}$ (при достаточно большом сопротивлении $R_л$). Положительное рабочее напряжение на лопатках должно быть больше, чем $U_{л.\ макс}$, а отрицательное — меньше (в алгебраическом смысле), чем $U_{л.\ мин}$.

Приводим данные рабочего режима бинарного трохотрона типа ЛП-5: напряжение первого анода не более 100 *в*; напряжение второго анода 80—110 *в*; напряжение первого рельса 0 *в*; напряжение второго рельса минус 40 *в*; напряжение лопаток и пластин 80—110 *в*; ток катода 3 *ма* (устанавливается регулировкой напряжения первого анода).

7. КОЛЬЦЕВОЙ ТРОХОТРОН

Кольцевой трохотрон состоит из десяти камер, симметрично расположенных вокруг цилиндрического катода (рис. 19). Каждая камера ограничивается переключающими электродами-лопатками ($Л_1$, $Л_2$, ..., $Л_{10}$) и выходными электродами-пластинами ($П_1$, $П_2$ .., $П_{10}$). Внутри каждой камеры располагается управляющий электрод

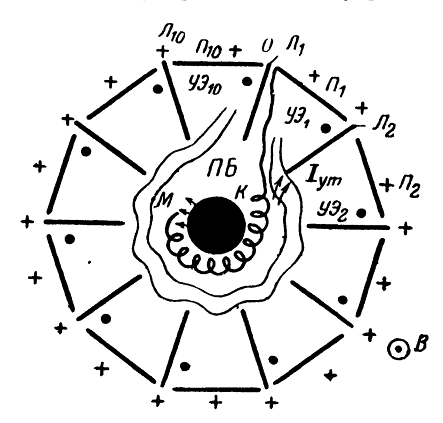


Рис. 19. Схема образования пучка в кольцевом трохотроне.

($УЭ_1$, $УЭ_2$, ..., $УЭ_{10}$). Магнитное поле направлено вдоль оси симметрии трохотрона (перпендикулярно плоскости чертежа).

Если все лопатки находятся под положительным потенциалом, то электроны, вылетающие из катода, при достаточно сильном магнитном поле не будут попадать на лопатки, а, вращаясь вокруг катода, образуют электронное облако. При этом кольцевой трохотрон можно рассматривать как цилиндрический магнетрон, находящийся в режиме отсечки.

Исходя из теории цилиндрического магнетрона, можно определить напряжение отсечки:

$$U_{отс.ц} = \frac{1}{8} \cdot \frac{e}{m} B^2 r_к^2 \left(\frac{r_а}{r_к} - \frac{r_к}{r_а}\right)^2,$$

где B — магнитная индукция;

$r_к$ — радиус катода;

$r_а$ — радиус, на котором расположены концы лопаток.

Рабочий режим напряжения на лопатках трохотрона соответствует режиму полной магнетронной отсечки $U_л \leqslant U_{отс\,ц}$. Ток на лопатки отсутствует. Если на одну из лопаток трохотрона подать нулевой потенциал, то картина поля в трохотроне резко изменится. В части канала, расположенной под лопаткой с нулевым потенциалом, напряженность поля уменьшится. В этой области образуется потенциальный барьер. Часть электронного облака отойдет от катода и, образовав пучок, направится в камеру, находящуюся перед этой лопаткой.

Картину образования и прохождения луча в камеру можно несколько уяснить из рис. 19. Электроны в основном эмиттируются из части катода M, расположенной под положительными лопатками, следующими за лопаткой $Л_1$, имеющей нулевой потенциал. Эмиссия электронов из остальных частей катода подавляется пространственным зарядом электронного потока, огибающего катод. В области между лопаткой $Л_1$ и катодом электрическое поле слабое, вследствие чего здесь накапливается пространственный заряд, что создает потенциальный барьер *ПБ* для пучка. Основная часть электронного потока, встречая на пути потенциальный барьер, отклоняется и попадает в первую камеру. Здесь поле между двумя лопатками приблизительно однородно. Поэтому, попадая сюда, электронный поток движется вдоль лопатки к пластине. В глубине камеры бо́льшая часть электронного потока попадает на пластину $П_1$, имеющую положительный потенциал.

Направление магнитного поля определяет направление движения электронов вокруг катода и ту камеру, куда попадает пучок (рабочую камеру). Лопатка, расположенная за рабочей камерой по направлению вращения электронов, называется «предыдущей». Изменение потенциала на предыдущей лопатке не влияет на траектории электронов.

Для стабильной работы трохотрона в схемах переключения, которые будут рассмотрены ниже, последующая лопатка (положительная лопатка рабочей камеры) не должна брать на себя электронов. Если считать потенциал этой лопатки равным $U_л$, потенциал другой лопатки рабочей камеры равным нулю, а расстояние между лопатками в камере равно d, то по аналогии с плоским магнетроном можно определить потенциал отсечки для камеры, считая поле в ней однородным:

$$U_{отс.п} = \frac{e}{2m} B^2 d^2.$$

Для отсутствия тока на положительную лопатку необходимо, чтобы ее потенциал $U_л$ был одновременно ниже потенциала отсечки между катодом и лопатками. ($U_л < U_{отс.\,ц}$) и ниже потенциала отсечки для камеры ($U_л < U_{отс.\,п}$).

Под действием собственного пространственного заряда электронный поток при огибании катода будет несколько расфокусироваться. Это приводит к появлению утечек тока $I_{ут}$ на лопатку $Л_2$ и на лопатку $Л_1$, имеющую нулевой потенциал. Часть электронов не перехватывается полем лопатки (потенциальным барьером) и проходит дальше, огибая катод.

Основными характеристиками трохотрона являются вольт-амперные характеристики переключающих электродов (лопаток), показанные на рис. 20. Здесь характеристика *I* дает зависимость тока на лопатку от напряжения на ней *при положительном напряжении на всех других электродах*, а характеристика *II* показывает зависимость тока на лопатку *при нулевом потенциале на предыдущей лопатке*

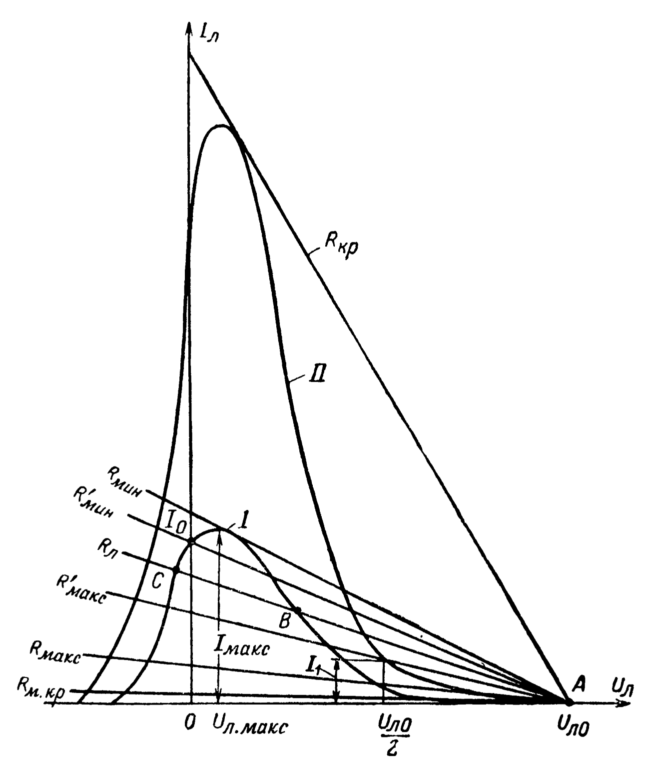


Рис. 20. Статические вольт-амперные характеристики лопатки кольцевого трохотрона.

(расположенной за данной лопаткой по направлению вращения электронного пучка вокруг катода). Ход статических характеристик *I* и *II* может быть качественно объяснен следующим образом.

Начиная с режима выключенного пучка (отсечка пучка), понижение напряжения на одной из лопаток будет изменять конфигурацию электрического поля так, что некоторые электроны начнут попадать на эту лопатку. Чем ниже потенциал лопатки, тем больше электронов входит в камеру и ток пучка на лопатку увеличивается. Когда же напряжение лопатки приближается к нулю, электроны

теряют скорость при приближении к лопатке и ток последней уменьшается. Сказанное относится к характеристике *I*.

Если одна из лопаток уже имеет потенциал катода, то уменьшение потенциала последующей лопатки ведет к увеличению числа электронов, попадающих в соответствующую камеру, и тем самым к увеличению тока в характеристике последующей лопатки. Поэтому характеристика *II* идет выше, чем характеристика *I*. Когда лопатка имеет потенциал катода, в цепи предыдущей лопатки ток отсутствует.

Рассмотрим, как влияет величина нагрузочного сопротивления $R_л$, включенного в цепь лопатки, на возможность получения устойчивых состояний пучка в трохотроне.

Если сопротивление в цепи лопатки мало ($R_л < R_{кр}$), то нагрузочная прямая проходит выше обеих характеристик трохотрона и имеется только одна устойчивая точка (точка *A*, соответствующая напряжению на лопатке, равному напряжению источника питания лопаток $U_{л0}$). При такой нагрузке в цепях лопаток трохотрон устойчиво может находиться только в выключенном состоянии.

Если же сопротивление в цепи лопатки будет больше, чем $R_{кр}$, но меньше, чем $R_{мин}$, то пучок *при низком потенциале предыдущей лопатки* может блокироваться в данной камере, так как имеется устойчивая точка *C* на характеристике *II*. Однако при повышении потенциала предыдущей лопатки эта устойчивая точка пропадает, так как нагрузочная прямая имеет с характеристикой *I* только одну точку пересечения, соответствующую режиму выключения трохотрона.

С другой стороны, если сопротивление в цепи лопатки будет больше величины $R_{макс}$, то камера будет иметь только одно устойчивое состояние, соответствующее блокировке пучка в данной камере (величина $R_{макс}$ определяется тангенсом угла наклона касательной к характеристике *II* в правой части последней). При сопротивлении в цепи лопатки, превышающем $R_{макс}$, пучок не сможет находиться долго в данной камере и будет самопроизвольно переключаться последовательно из камеры в камеру.

Итак, если сопротивление в цепи лопатки выбрано в пределах $R_{мин} < R_л < R_{макс}$, лопатка камеры будет иметь два устойчивых состояния: одно, соответствующее точке *A* (пучок отсутствует в данной камере и потенциал лопатки близок к напряжению источника питания $U_{л0}$), и другое, соответствующее точке *C* (пучок проходит в данную камеру и на пластину, причем часть его попадает на лопатку и, создавая падение напряжения на сопротивлении $R_л$, понижает потенциал лопатки почти до потенциала катода, тем самым устойчиво блокируя пучок в данной камере).

Если сопротивление в цепи лопатки будет больше, чем $R_{м.кр}$ (последнее определяется тангенсом угла наклона касательной к характеристике *I* в правой ее части), то трохотрон сразу же после подачи напряжения питания $U_{л0}$ самопроизвольно включится и затем пучок в нем будет переключаться (опять-таки самопроизвольно) из камеры в камеру. Таким образом, если в цепь каждой лопатки трохотрона включить одинаковые сопротивления $R_л$, то в зависимости от величины этих сопротивлений может наблюдаться несколько различных режимов:

1. $R_л < R_{кр}$ — трохотрон заперт. Пучок можно направить в камеру, только понижая потенциал лопатки.

2. $R_{кр}<R_{л}<R_{мин}$ — трохотрон заперт. Пучок может быть переключен в данную камеру, если лопатке предыдущей камеры сообщить потенциал катода. При повышении потенциала лопатки предыдущей камеры трохотрон автоматически выключается.

3. $R_{мин}<R_{л}<R_{макс}$ — трохотрон имеет одиннадцать устойчивых состояний, при одном из которых трохотрон выключен, при остальных (десяти) пучок попадает в каждую из камер. Этот режим будем считать рабочим режимом трохотрона.

4. $R_{макс}<R_{л}<R_{м.\,кр}$ — трохотрон генерирует после включения пучка, который самостоятельно переключается поочередно из камеры в камеру.

5. $R_{м.\,кр}<R_{л}$ — пучок самопроизвольно включается, а затем переключается поочередно из камеры в камеру, причем трохотрон генерирует.

Рассмотрим, какое влияние на работу трохотрона оказывает изменение напряжения питания лопаток $U_{л0}$. Мы знаем, что при номинальном напряжении питания $U_{л0}=U_{ном}$ и правильно выбранном сопротивлении $R_{л}$ пучок может быть устойчиво заблокирован в камере. Такой режим работы определяется вольт-амперными характеристиками и нагрузочной прямой, изображенными на рис. 21 штриховыми линиями.

При уменьшении напряжения $U_{л0}$ нагрузочная прямая смещается влево. Одновременно уменьшение напряжения $U_{л0}$ вызывает довольно быстрое понижение вольт-амперных характеристик лопаток, и при некотором напряжении $U_{н}$ характеристика I пройдет ниже линии нагрузки $R_{л}$, т. е. лопатка перестанет блокировать пучок (см. сплошные линии на рис. 21,*а*). Напряжение питания $U_{н}$, при котором лопатка с сопротивлением $R_{л}$ перестает блокировать пучок в данной камере, является нижним пределом напряжения питания для данного сопротивления $R_{л}$.

При увеличении напряжения питания нагрузочная прямая смещается вправо, а вольт-амперные характеристики лопатки быстро возрастают. Вследствие подъема правой части характеристики II линия нагрузки $R_{л}$, начиная с некоторого значения напряжения питания $U_{в}$, имеет только одну устойчивую точку C' пересечения с характеристикой II (см. сплошные линии на рис. 21,*б*). Поскольку устойчивая точка A на характеристике II пропадает, пучок в трохотроне начинает самопроизвольно переключаться из камеры в камеру. Напряжение питания $U_{в}$, при котором начинается это самопереключение пучка, является верхним пределом напряжения питания $U_{в}$ для данного сопротивления $R_{л}$. Для нормальной работы трохотрона напряжение питания лопаток $U_{л0}$ должно находиться в интервале между нижним и верхним пределами напряжения питания для данного $R_{л}$, т. е. $U_{н}<U_{л0}<U_{в}$.

Наглядно рабочую область трохотрона можно представить из рассмотрения графиков зависимости верхнего и нижнего пределов напряжений от сопротивления $R_{л}$ или зависимости $R_{макс}$ и $R_{мин}$ от напряжения питания $U_{л0}$ (рис. 22). В области, заключенной между кривыми $R_{макс}$ и $R_{мин}$, трохотрон будет работать стабильно. Из рис. 22 можно определить допустимые пределы изменений как сопротивлений в цепи лопаток $R_{л}$, так и напряжения питания $U_{л0}$.

Величины $R_{макс}$ и $R_{мин}$, как было сказано ранее, зависят от вольт-амперных характеристик лопатки I и II. Эти характеристики являются функциями напряжений на всех электродах и напряжен-

ности магнитного поля. Для простоты предположим, что напряженность магнитного поля постоянна и поле однородно, а напряжение на всех пластинах, управляющих электродах и лопатках, кроме $Л_N$ и $Л_{N+1}$, равно напряжению питания лопаток $U_{л0}$. Вид характеристик *I* и *II* будет зависеть от напряжения питания лопаток. Аналитически очень трудно определить ход этих характеристик, поскольку процесс формирования электронного пучка при наличии пространственного заряда является очень сложным. В связи с этим

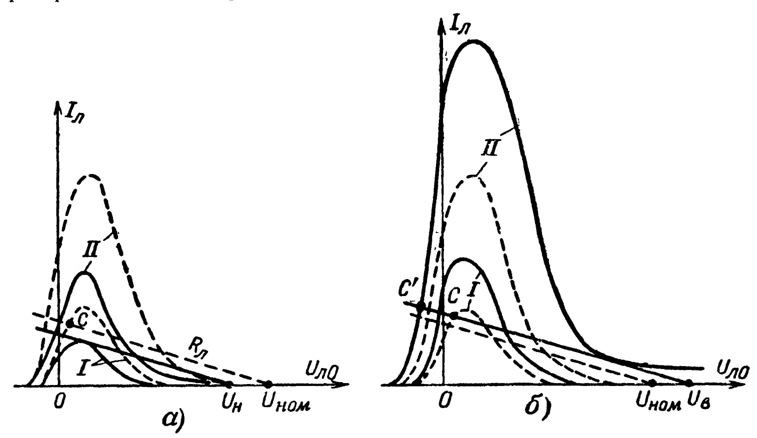


Рис. 21. Определение нижнего (*а*) и верхнего (*б*) пределов напряжения питания лопаток.

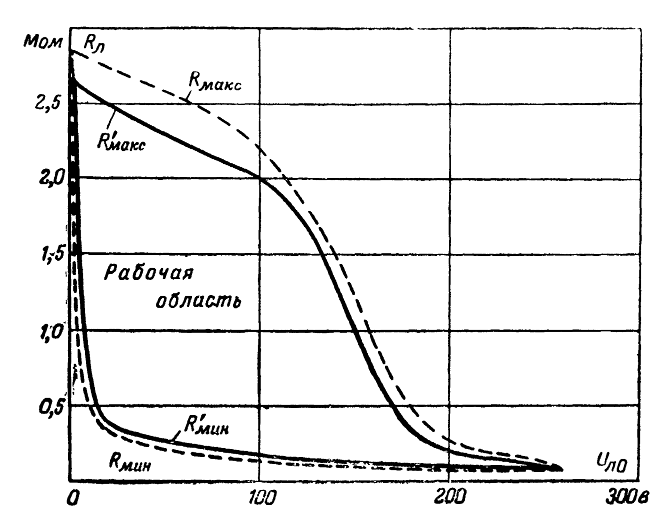


Рис. 22. Рабочая область кольцевого трохотрона.

основным методом расчета рабочих областей является получение опытным путем вольт-амперных характеристик, а затем графическое определение рабочих областей. Точные величины $R_{мин}$ и $R_{макс}$ определяются по линиям нагрузки, которые касаются вольт-амперных характеристик лопатки *I* и *II*, как показано на рис. 20. Форма вольт-амперных характеристик зависит от напряжения $U_{л0}$, поэтому если необходимо точно определить пределы рабочей области, то нужно найти величины $R_{мин}$ и $R_{макс}$ по характеристикам лопатки для ряда значений $U_{л0}$ построением, как на рис. 20. Этот метод определения рабочей области довольно кропотлив и трудоемок.

Возможен метод опытного определения границ рабочей области. С этой целью для нескольких значений сопротивлений в цепях лопаток $R_л$ определяются верхний и нижний пределы напряжения питания $U_{л0}$. Для этого пучок направляется в данную камеру и блокируется в ней. При изменении напряжения питания $U_{л0}$ фиксируется напряжение, при котором трохотрон выключается (это нижний предел напряжения $U_н$) и напряжение питания, при котором пучок самопроизвольно переключается в последующую камеру (это верхний предел напряжения $U_в$). Такой метод позволяет довольно точно определить рабочие пределы трохотрона, но он трудоемок, особенно при снятии всей области в широких пределах.

Можно рекомендовать следующий, более простой метод определения границ рабочей области. Вместо точных величин $R_{мин}$ и $R_{макс}$ находим их приближенные значения $R'_{мин}$ и $R'_{макс}$, причем $R'_{мин} > R_{мин}$, а $R'_{макс} < R_{макс}$, и принимаем эти приближенные значения за границы рабочей области.

В этом случае величина $R_л$ удовлетворяет условию $R_{мин} \leqslant R'_{мин} < R_л < R'_{макс} \leqslant R_{макс}$ и выбор $R_л$ осуществляется с некоторым запасом надежности.

Величины $R'_{мин}$ и $R'_{макс}$ находим следующим образом.

Величина $R'_{мин}$ определяется вольт-амперной характеристикой лопатки, снятой в режиме, когда все другие электроды находятся под напряжением источника питания $U_{л0}$ (кривая *I* на рис. 20). Максимум этой кривой всегда наблюдается при небольшом положительном потенциале лопатки $U_{л.\,макс}$. Но при нулевом потенциале лопатки ее ток I_0 мало отличается от максимального. Поэтому для упрощения расчета можно принять:

$$R'_{мин} = \frac{U_{л0}}{I_0}.$$

Найденная таким образом величина $R'_{мин}$ будет несколько больше действительной.

Для определения величины $R'_{мин}$ при различных значениях $U_{л0}$ нужно снять характеристику тока I_0 на лопатку при нулевом ее потенциале, когда напряжение $U_{л0}$ на остальных лопатках изменяется. На основе снятой кривой зависимости I_0 от $U_{л0}$ (рис. 23) можно построить кривую зависимости $R'_{мин}$ от $U_{л0}$ (рис. 22).

В качестве $R'_{макс}$ можно принять такую величину сопротивления, при которой нагрузочная прямая пересекает характеристику *II* в неустойчивой точке при напряжении, равном $U_{л0}/2$. Отсюда

$$R'_{макс} \approx \frac{U_{л0}}{2I_1},$$

где I_1 — ток лопатки при условии, что потенциал предыдущей лопатки равен 0, потенциал данной лопатки равен $U_{л0}/2$, а потенциалы остальных лопаток и всех электродов равны $U_{л0}$. Величина $R'_{макс}$, определенная таким образом, будет меньше действительной величины $R_{макс}$, но это расхождение незначительно.

Если снять зависимость тока I_1 на данную лопатку при ее потенциале, равным половине напряжения на других лопатоках $U_{л0}/2$ и (одновременно) при нулевом потенциале на предыдущей лопатке (рис. 23), то по этой кривой делением значений тока I_1 на половину напряжения $U_{л0}$ мы можем построить кривую зависимости $R'_{макс}$ от $U_{л0}$ (рис. 22). При этом удобно откладывать на графике удвоен-

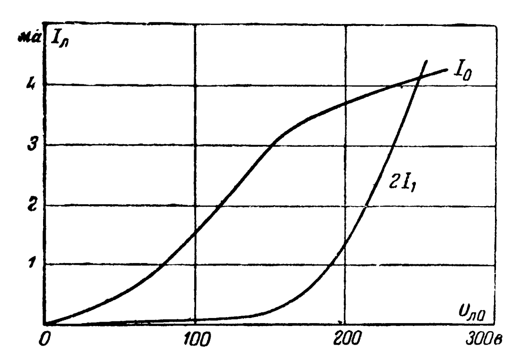


Рис. 23. Зависимости токов на N-ю лопатку под нулевым потенциалом I_0 и на лопатку $N+1$-ю, имеющую потенциал, равный половине напряжения питания, от напряжения питания $U_{л0}$.

ную величину тока и делить ее затем не на половину, а на всю величину $U_{л0}$.

Описанным методом можно сравнительно хорошо определять примерные рабочие области прибора.

Для получения кривых зависимости I_0 от $U_{л0}$ и I_1 от $U_{л0}$ на экране осциллографа можно воспользоваться схемой, приведенной на рис. 24. На все лопатки, кроме N и $N+1$, подается переменное напряжение $U_{\sim}$; на лопатку N подается нулевой потенциал, а на лопатку $N+1$ — половина переменного напряжения. Развертка осциллографа осуществляется тем же напряжением (или изменяющимся по аналогичному закону). Подавая на вертикально отклоняющие пластины напряжение с небольшого сопротивления ($R_1=1$ *ком*), включенного в цепь лопатки N или в цепь лопатки $N+1$, на экране осциллографа получим соответственно кривые зависимости I_0 от $U_{л0}$ и I_1 от $U_{л0}$. Для получения другого масштаба I_1 в цепь лопатки $N+1$ нужно включить другое сопротивление.

В описанной схеме измерения несколько уменьшается точность определения верхней границы, так как кривая I_0 при одновременном снятии кривых загибается быстро при больших напряжениях вследствие перехвата большой части электронов лопаткой $N+1$.

Для стабильной работы трохотрона желательно иметь большие пределы допустимых изменений рабочих сопротивлений и напряжений. Если напряжение $U_{\text{л}0}$ и сопротивление $R_{\text{л}0}$ изменяются настолько, что рабочая точка остается в рабочей области, то схема трохотрона надежно работает при этих изменениях. Наиболее надежная работа схемы будет в середине рабочей области. Очевидно, максимальный допуск зависит от положения рабочей точки и максимально допустимое отклонение одного параметра зависит от возможного изменения других параметров.

При рассмотрении рабочих областей трохотрона напряжение на выходных электродах (пластинах) $U_{\text{п}}$ и напряжение на управляющих электродах $U_{\text{упр}}$ были равны напряжению питания лопаток

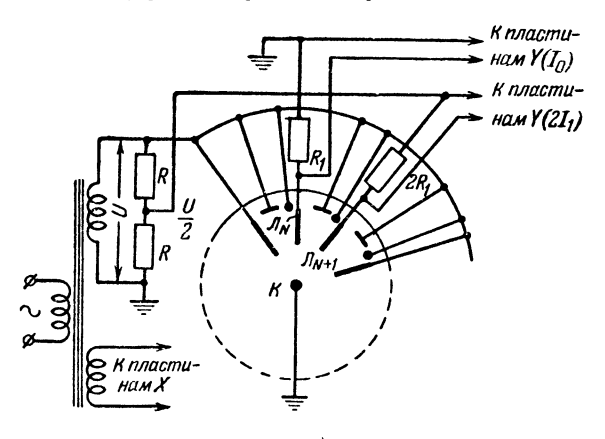


Рис. 24. Схема для получения на экране осциллографа зависимостей токов I_0 и I_1 от напряжения $U_{\text{л}0}$.

$U_{\text{л}0}$. При переключении пучка и снятии выходных сигналов напряжения на этих электродах могут отличаться от напряжения питания $U_{\text{л}0}$. Конфигурация электрического поля окажется другой, что будет изменять форму пучка и тем самым распределение токов. Установлено, что это мало влияет на величину минимального сопротивления в цепи лопатки. Но наличие токов утечки на предыдущую лопатку изменяет величину верхнего предела $R_{\text{макс}}$. Вообще чем ниже напряжение на пластине или на управляющем электроде, тем больше ток утечки и соответственно ниже верхний предел $R_{\text{макс}}$.

Вольт-амперная характеристика выходного электрода (пластины) имеет вид пентодной характеристики. Блокирующая лопатка получает для блокировки пучка очень небольшую часть (около 0,1) его тока, а остальной ток попадает на пластину. Ток пластины почти не меняется в большом диапазоне напряжений (от напряжения отсечки и выше). Напряжение отсечки $U_{\text{отс}}$ есть то напряжение, ниже которого пластина начинает сталкивать с себя пучок.

В рабочем диапазоне напряжений питания лопаток напряжение отсечки приблизительно равно 0,5 $U_{\text{л}0}$. Если напряжение пластины ниже, чем $U_{\text{отс}}$, то пучок начинает отталкиваться от пластины и рас-

полагается ближе к последующей лопатке. Ток утечки на эту лопатку возрастает, тем самым снижается верхний предел $R_{макс}$. Наибольшее допустимое напряжение на пластине определяется величиной пробивного напряжения и мощностью рассеивания.

При работе схемы в режиме переключения запускающее напряжение подается на управляющие электроды. Чтобы небольшое входное напряжение (на управляющих электродах) уже смещало пучок, на управляющий электрод должно быть подано напряжение смещения. Низкое напряжение на управляющем электроде вызывает большой ток утечки, что снижает верхний предел сопротивления $R_{макс}$ и надежность работы.

В процессе изучения рабочих областей трохотрона мы предполагали, что характеристика *II* переключающей лопатки снималась при потенциале блокирующей лопатки, равном потенциалу катода На практике потенциал блокирующей лопатки несколько ниже потенциала катода и зависит от нагрузочного сопротивления $R_л$. Этот отрицательный потенциал может изменять характеристику *II* переключающей лопатки, влияя тем самым на верхний предел $R_{макс}$. Установлено, что ток утечки на переключающую лопатку снижается при понижении потенциала удерживающего электрода. Поэтому верхний предел $R_{макс}$ практически оказывается выше, чем тот, который получается, когда удерживающий электрод имеет потенциал катода.

Верхний предел рабочего напряжения ограничивается током утечки и зависит как от геометрии прибора, так и от величины магнитного поля. Например, для одного из зарубежных трохотронов МО-10 максимальное рабочее напряжение

$$U_{л0} \leqslant 10^5 B^2.$$

Величина выходного тока электронного пучка ограничивается возникновением пространственного заряда в камере между блокирующей и переключающей лопатками. Если напряжение на блокирующей лопатке принять за 0, а напряжение на переключающей лопатке за $U_{л0}$, то ток пластины

$$I_п = 4 \cdot 10^{-8} \frac{U_{л0}^2}{B}.$$

При работе трохотрона выходной ток (ток пластины) изменяется от электрода к электроду вследствие разницы в расстояниях между электродами. Значение $I_п$, вычисляемое по вышеприведенной формуле, должно выдерживаться с точностью до 10%.

Если принять во внимание допустимую мощность на пластине, то верхний предел рабочего напряжения будет другим. Если $U_п = U_{л0}$, то мощность, рассеиваемая пластиной,

$$P_п = U_{л0} I_п = 4 \cdot 10^{-8} \frac{U_{л0}^3}{B}.$$

Допустимая мощность на одной пластине трохотрона МО-10 около 2 *вт*. Поэтому верхний предел рабочего напряжения для статического режима

$$U_{л0} = 3{,}70 \cdot 10^2 B^{1/3}.$$

Предполагая, что рассеиваемая мощность распределяется равномерно между всеми десятью пластинами, получим верхний предел напряжения:

$$U_{\text{л}0}=7{,}94\cdot 10^2 B^{1/3}.$$

Поперечное сечение одного из типов кольцевого трохотрона показано на рис. 25. Там же показана часть рабочей области трохотрона, приведены зависимости тока пластины $I_{\text{п}}$ от напряжения питания $U_{\text{л}0}$ для различных сопротивлений в цепи лопаток $R_{\text{л}}$.

Напряжение на управляющем электроде, необходимое для переключения пучка с пластины $П_N$ на лопатку $Л_{N+1}$, должно быть по-

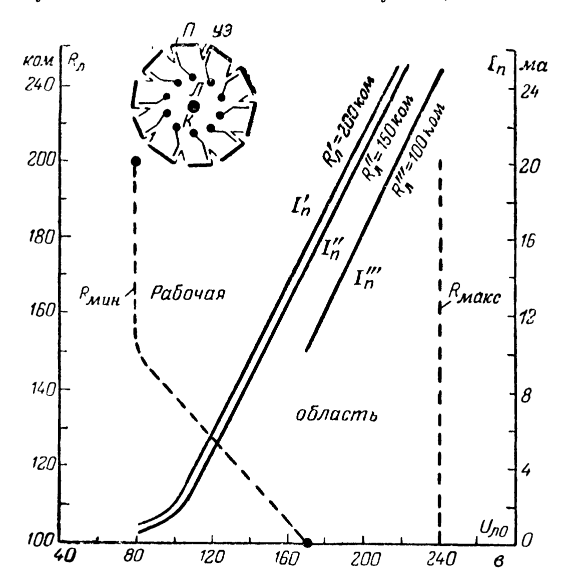


Рис. 25. Поперечное сечение, рабочие области и токи на пластину кольцевого трохотрона.

рядка 75—100 *в* при напряжении питания $U_{\text{л}0}=150$ *в*. При токе пучка 8—10 *ма* максимальный ток в цепи управляющего электрода составляет около 3,5 *ма*.

В кольцевом трохотроне для увеличения быстродействия прибора надо иметь значительный ток пучка, малую рабочую емкость C и малое нагрузочное сопротивление $R_{\text{л}}$. В некоторых типах трохотронов для уменьшения емкостей нагрузочные сопротивления лопаток $R_{\text{л}}$ монтируются внутри вакуумного баллона и выводятся только общая точка питания лопаток и нулевая лопатка.

Приводим основные параметры такого трохотрона: напряжение питания 250 ± 25 *в*; напряжение на управляющих электродах не менее 150 *в* (измеряется при напряжении пластин и лопаток 250 *в*, напряжении экрана минус 75 *в*, амплитуде коммутирующих им-

пульсов 300 *в*, частоте переброса пучка 10 *гц* и определяется как минимальное напряжение, при котором пучок последовательно переводится из камеры в камеру); ток в цепи каждой группы управляющих электродов в типовом режиме не более 2 *ма*; ток в цепи каждой пластины в типовом режиме не менее 8 *ма*; частота пересчета в режиме непрерывного действия 6—8 *Мгц*; разрешающая способность в парных импульсах 40—60 *нсек*. Трохотрон имеет визуальную индикацию положения пучка внутри прибора.

8. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ НА КОЛЬЦЕВЫХ ТРОХОТРОНАХ

На рис. 26 приведена схема включения десятикамерного кольцевого трохотрона. Каждая лопатка подключается через сопротивление $R_л$ к положительному относительно катода зажиму источника питания $U_{л0}$. Выходные электроды (пластины) подключены через нагрузочные сопротивления $R_п$ к положительному зажиму источника



Рис. 26. Схема включения кольцевого трохотрона.

U_0. Напряжение U_0 может выбираться в широких пределах. Однако не следует брать его ниже 0,5 $U_{л0}$, так как это приводит к увеличению токов утечки на лопатки, вследствие чего может наступить режим самопереключения пучка.

В приведенной схеме включения при соответствующем выборе величин сопротивлений и напряжений на электродах трохотрон может иметь десять устойчивых состояний, соответствующих блоки-

ровке пучка в каждой из десяти камер, и устойчивое одиннадцатое состояние, соответствующее режиму магнетронной отсечки, когда пучок в приборе отсутствует.

Влияние цепи лопатки на блокировку и переключение пучка. После подачи напряжения питания пучка в приборе не будет до тех пор, пока мы принудительно не понизим потенциал одной из лопаток (например, первой) примерно до потенциала катода. В этом случае часть потока электронов, движущегося вокруг катода, образует электронный пучок, который проходит в камеру перед лопаткой с низким потенциалом. Следует еще раз отметить, что направление движения пучка в трохотроне обратно направлению переключения, т. е. порядку цифр на рис. 26.

Часть тока пучка, попадая на первую лопатку, будет поддерживать ее потенциал низким (близким к потенциалу катода) даже после снятия внешнего воздействия на данную лопатку (почти все напряжение $U_{л0}$ падает на сопротивлении, включенном в цепь лопатки). Основная же часть пучка (примерно 90%) попадает на пластину рассматриваемой камеры. Такой режим прохождения пучка в одну из камер является устойчивым—пучок блокируется в данной (первой) камере.

Как уже отмечалось, понижение потенциала на одной из лопаток, расположенных за лопаткой с нулевым потенциалом (по направлению вращения пучка), т. е. в нашем случае лопаток $Л_{10}$—$Л_7$, не вызовет переключения пучка в соответствующую камеру, так как он перехватывается лопаткой $Л_1$, а новый пучок на небольшом расстоянии под двумя-тремя лопатками сформироваться не может. Если теперь понизить потенциал одной из лопаток, расположенных перед лопаткой $Л_1$ (лопатки $Л_2$—$Л_5$), то пучок будет перехватываться этой лопаткой (имеющей пониженный потенциал) и попадет в камеру перед ней. Пучка в первой камере не будет. При понижении потенциала на лопатке $Л_6$, по расположению диаметрально противоположной лопатке $Л_1$, может наблюдаться один из описанных процессов в зависимости от режима.

Переключение пучка в трохотроне путем внешнего воздействия на цепи лопаток применяется довольно редко. Обычно его переключение из одной камеры в другую производится понижением потенциала на управляющем или выходном электроде данной камеры.

Переключение пучка в трохотроне с помощью управляющих электродов. При понижении потенциала управляющего электрода той камеры, в которой находится пучок (в нашем случае—первой камеры), часть пучка, попадающего на пластину $П_1$, перейдет на лопатку $Л_2$. Вследствие падения напряжения на сопротивлении $R_л$ потенциал лопатки $Л_2$ понизится примерно до потенциала катода. Это вызовет переключение пучка из первой камеры во вторую и устойчивое положение (блокировку) пучка во второй камере. Подавая отрицательные импульсы последовательно на управляющие электроды каждой камеры, можно осуществить переключение пучка из камеры в камеру.

Аналогичный результат можно было бы получить, подавая отрицательные импульсы в цепи пластин (что и используется при работе с линейными трохотронами). Однако в этом случае цепи пластин сильно нагружали бы источник импульсов вследствие больших токов на пластинах и в качестве выходных электродов пришлось бы использовать лопатки, что ухудшает быстродействие, так как

подключение емкости нагрузки к высокоомному сопротивлению нагрузки в цепи лопатки увеличивает время переключения. Кольцевой трохотрон в этом отношении имеет явные преимущества перед линейным, так как у него есть специальные управляющие электроды с малыми токами (0—3 *ма*) в их цепях.

Управляющие электроды конструктивно соединены внутри прибора через один в две группы. Для управления отрицательные импульсы можно подавать одновременно на все управляющие электроды. В этом случае выводы обеих групп должны быть соединены вместе. Для нормального переключения пучка от каждого импульса только на одну камеру необходимо иметь входные импульсы, точно сформированные как по длительности, так и по амплитуде, чтобы за время действия импульса потенциал лопатки, в камеру которой переходит пучок, успел понизиться примерно до нуля (принимая во внимание наличие паразитных емкостей). С другой стороны, длительность импульса должна быть не очень велика, чтобы при подаче одного импульса не произошло двойного переключения (т. е. сразу из первой камеры в третью) или даже еще на большее число камер. Таким образом, рассматриваемый способ переключения предъявляет довольно строгие требования к формирователю входных импульсов.

Более надежное переключение пучка в приборе происходит, если обе группы управляющих электродов подключить к формирователю по двухтактной схеме. В этом случае отрицательные перепады напряжения с формирователя подаются поочередно то на одну, то на другую группу управляющих электродов, причем когда на одну группу поступает отрицательный перепад, на другую в то же самое время поступает положительный. Это устраняет возможность двойного переброса пучка, так как никогда одновременно потенциал на управляющих электродах соседних камер не бывает ниже потенциала, при котором происходит переброс. Верхний предел длительности импульса с формирующего устройства при этом не ограничен. В качестве формирователя могут быть использованы триггеры, мультивибраторы или парафазные усилители. Переключение пучка таким способом возможно и при подаче синусоидального двухтактного напряжения на две группы управляющих электродов.

Включение пучка. Если параметры схемы выбраны так, чтобы обеспечить нормальный рабочий режим, то после включения питающих напряжений пучка в трохотроне не будет (режим магнетронной отсечки). Это и есть устойчивое состояние трохотрона. Чтобы установить пучок в какой-либо камере трохотрона (включить трохотрон), необходимо кратковременно понизить потенциал на лопатке данной камеры примерно до потенциала катода. При этом сформированный пучок будет заблокирован в данной камере за счет падения напряжения на сопротивлении $R_л$.

На рис. 27 показаны три способа понижения потенциала на лопатке первой камеры для включения пучка. При первом способе (рис. 27,*а*) установка пучка производится с помощью контакта кнопки или реле. Сопротивление R_1 выбирают таким, чтобы на лопатке при замыкании контактов создавался потенциал, близкий к потенциалу катода. В этой схеме паразитная емкость контакта отделена от лопатки высокоомным сопротивлением R_1 и благодаря этому она не ухудшает быстродействие схемы. Однако сам процесс установки пучка имеет в данном случае некоторую инерционность вследствие

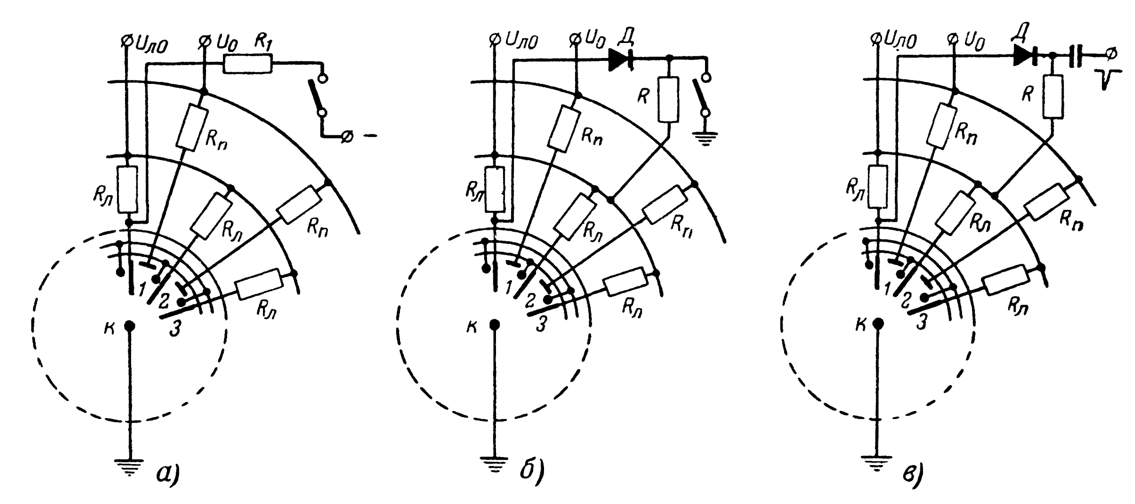


Рис. 27. Схемы включения пучка в кольцевом трохотроне.

того, что скорость понижения потенциала на лопатке определяется постоянной времени цепочки из сопротивления R_1 и паразитной емкости лопатки.

В схемах на рис. 27,*б* и *в* емкость цепи включения пучка отделена от лопатки с помощью полупроводникового диода, так как при понижении потенциала на лопатке диод *Д* запирается. Следовательно, и здесь быстродействие схемы сохраняется. В то же время при установке пучка разряд паразитной емкости лопатки происходит очень быстро через малое прямое сопротивление диода. Установка пучка может производиться либо с помощью контактов (рис. 27,*б*), либо отрицательным импульсом (рис. 27,*в*).

Импульсная установка пучка необходима в целом ряде устройств, например в делителях частоты с переменным коэффициентом деления, измерителях частоты и т. п. Минимальная величина длительности импульсов для установки пучка в реальных приборах составляет около 0,1 *мксек* при амплитуде 120—150 *в*.

Выключение (сброс) пучка. После окончания работы схемы пучок обычно остается заблокированным в одной из камер трохотрона. Рассмотрим способы выключения пучка, т. е. перевода трохотрона в состояние магнетронной отсечки.

Для выключения пучка достаточно понизить потенциал одновременно на всех лопатках примерно до потенциала катода на время, необходимое для выравнивания потенциалов всех лопаток. Если после этого потенциал на всех лопатках одновременно возрастет до $U_{л0}$, пучок не будет уже заблокирован ни в одной из камер.

На рис. 28,*а* приведена схема выключения пучка путем понижения потенциала общей точки *А* цепей лопаток. Последнее можно осуществлять либо с помощью отрицательных импульсов, как показано на схеме, либо с помощью контакта. Сопротивление R_1 выбирается намного меньшим, чем $R_л$, и поэтому на работу трохотрона оно не влияет. Следует отметить, что минимальная длительность импульса, необходимая для выключения пучка в данном случае, достаточно велика (порядка 0,7—1 *мксек* при амплитуде около 200 *в*). Это объясняется тем, что за время действия отрицательного импульса паразитные емкости в цепи лопаток должны успеть разрядиться через сопротивления $R_л$, величина которых обычно порядка 150 *ком*. На рис. 28,*б* показана схема, в которой импульс подается на все лопатки одновременно через полупроводниковые диоды *Д*. В этом случае требуется меньшая длительность импульса, так как паразитные емкости разряжаются через диоды.

В схеме, приведенной на рис. 28,*в* выключение пучка в трохотроне производится путем подачи положительного импульса в цепь катода трохотрона. Сопротивление $R_к$ (порядка 1—2 *ком*) не оказывает существенного влияния на работу прибора. Такая схема работает при длительностях импульсов порядка 0,1—0,3 *мксек* и амплитуде 150 *в*.

Установка пучка с предварительным сбросом. Такая задача наиболее часто встречается на практике. Здесь также существует несколько приемов, но все они основаны на описанных выше способах включения и выключения пучка. Как уже отмечалось, если пучок был заблокирован, например, в первой камере, то без предварительного сброса (выключения) пучок можно установить только в одну из камер, расположенных перед первой камерой по направ-

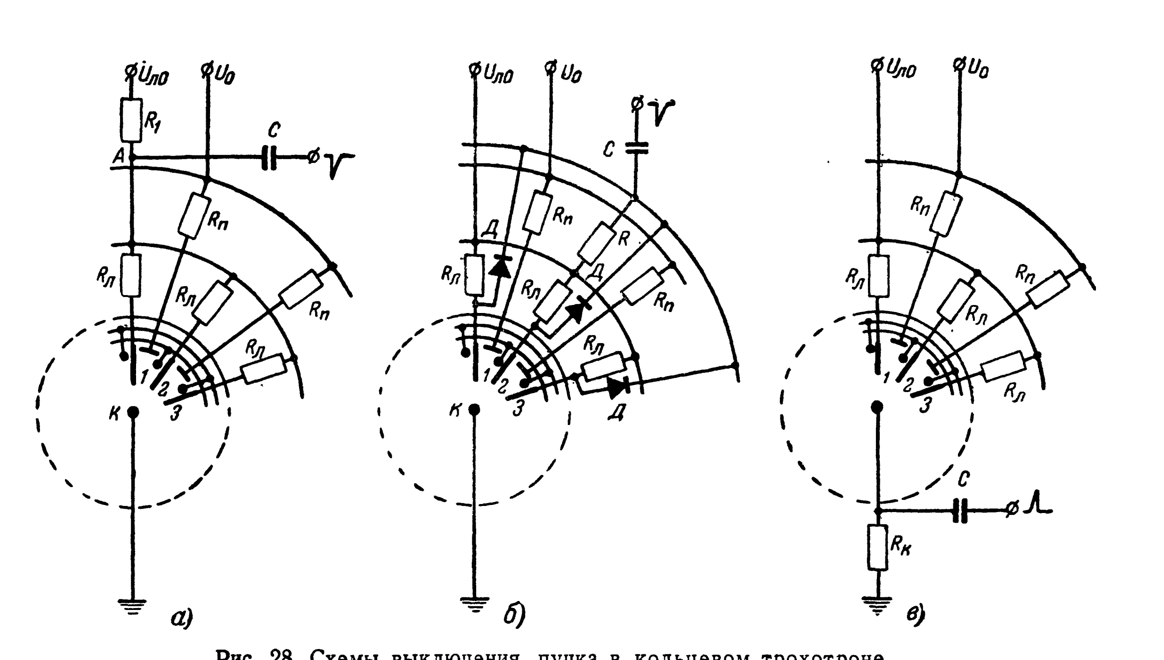


Рис. 28. Схемы выключения пучка в кольцевом трохотроне.

лению вращения пучка, т. е. в камеры 2, 3, 4. Если мы будем понижать потенциал лопаток в камерах 7, 8, 9, 10, то это не повлияет на устойчивое положение пучка в первой камере. Следовательно, перед установкой пучка необходимо производить сброс, т. е. совместить работу схем, показанных на рис. 27 и 28.

На рис. 29,*а* приведена схема сброса и установки пучка в первую камеру одним отрицательным импульсом. Импульс может быть создан замыканием контакта. При подаче импульса потенциал точек *Б* и *В* понижается. Понижение потенциала точки *В* приводит к выключению пучка из той камеры, где он был ранее. После окончания

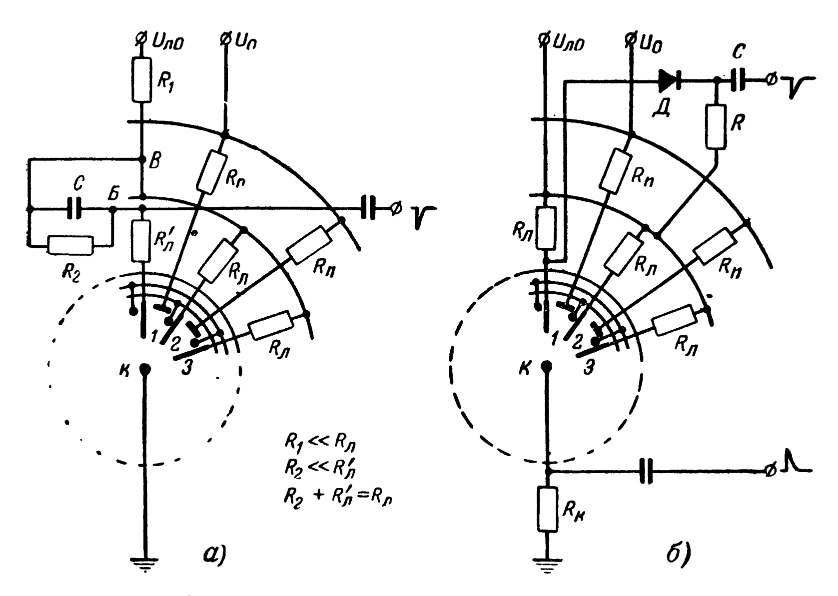


Рис. 29. Схемы установки пучка с предварительным сбросом.
а — одним импульсом; б — двумя импульсами.

импульса и восстановления потенциала точки *В* потенциал точки *Б* восстанавливается с некоторой задержкой, определяемой параметрами цепочки R_2C. Это приводит к тому, что пучок блокируется именно в той камере, в цепь лопатки которой включена цепочка R_2C. Отрицательный импульс для данного способа установки имеет минимальную длительность около 0,7—1 *мксек*, что в некоторых случаях неудовлетворительно.

На рис. 29,*б* показана схема, в которой сброс осуществляется положительным импульсом, подаваемым на катод, а установка— отрицательным импульсом, подаваемым на лопатку нужной камеры. О длительности этих импульсов говорилось выше. Задержка между положительным и отрицательным импульсами должна быть не менее длительности выключающего (положительного) импульса.

Рассмотренные способы импульсного сброса и установки пучка в трохотроне позволяют применять трохотрон в разнообразных быстродействующих импульсных устройствах.

9. ФОРМИРОВАТЕЛИ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ

Формирователи управляющих сигналов предназначены для надежного переключения пучка в трохотроне. Как было показано выше, переключение пучка в различных типах трохотронов производится либо с помощью пластин, либо с помощью специальных управляющих электродов. Принципиальной разницы в механизме переключения при этом нет. Однако для формирователя не безразлично, с помощью каких электродов производится переключение пучка в трохотроне, так как величина нагрузки на формирователь со стороны трохотрона в обоих случаях существенно различается. При использовании для переключения пучка пластин ток нагрузки в 10—20 раз больше тока, который требуется в случае использования для переключения специальных управляющих электродов. Общая распределенная емкость пластин также в несколько раз больше, чем общая распределенная емкость управляющих электродов. Так, например, для кольцевых трохотронов ток пластин обычно составляет 5—20 *ма*, распределенная емкость всех пластин 50—150 *пф*, ток управляющих электродов не более 0,2—2 *ма*, а распределенная емкость всех управляющих электродов 10—25 *пф*.

Следует отметить еще одно преимущество применения для переключения управляющих электродов, состоящее в том, что пластины в этом случае используются для съема выходных сигналов. Следовательно, емкости нагрузочных цепей подключены не к высокоомным цепям лопаток, а к низкоомным цепям пластин, что позволяет получать в схемах на трохотронах быстродействие, близкое к предельно возможной величине.

Существует три вида управляющих сигналов: одиночные отрицательные импульсы, двухтактные импульсные сигналы и двухтактные синусоидальные сигналы. В соответствии с этим рассмотрим три группы формирователей, применяемых в импульсных схемах с трохотронами.

Формирователи одиночных управляющих импульсов. Одиночные отрицательные импульсы подаются сразу на все десять управляющих электродов (или пластин). Выше были кратко рассмотрены требования к амплитуде и длительности этих импульсов.

На рис. 30 показаны области переключений в десятикамерном кольцевом трохотроне при подаче одиночных отрицательных импульсов сразу на все десять управляющих электродов. По осям отложены амплитуда и длительность входных импульсов.

Если амплитуда управляющих импульсов будет меньше $U_{мин}$, то переключения не будет ни при каких значениях длительности. Обычно эта величина равна нескольким десяткам вольт и зависит как от типа трохотрона, так и от начального смещения на группе управляющих электродов. Граничная сплошная кривая отделяет область отсутствия переключений от области переключений. В зависимости от соотношения амплитуды и длительности входного импульса можно попасть в любую из этих двух областей. Область переключений может быть сама разбита на несколько областей в зависимости от того, на сколько положений происходит переключение

пучка в трохотроне. Вдоль горизонтальной оси все кривые, разделяющие эти области, смещены друг относительно друга на величину времени t_1, зависящую как от постоянной времени цепей лопаток, так и от амплитуды управляющих импульсов. Рабочей для большинства схем является область, ограниченная сплошной и первой штриховой кривыми (на рисунке она заштрихована). Если параметры входного импульса соответствуют этой области, то от каждого входного импульса переключение происходит точно на одну камеру.

Величина времени t_1 для лучших образцов кольцевых трохотронов лежит в интервале 0,04—0,15 *мксек* и определяется в основном величиной тока пучка и распределенными емкостями лопаток. Более

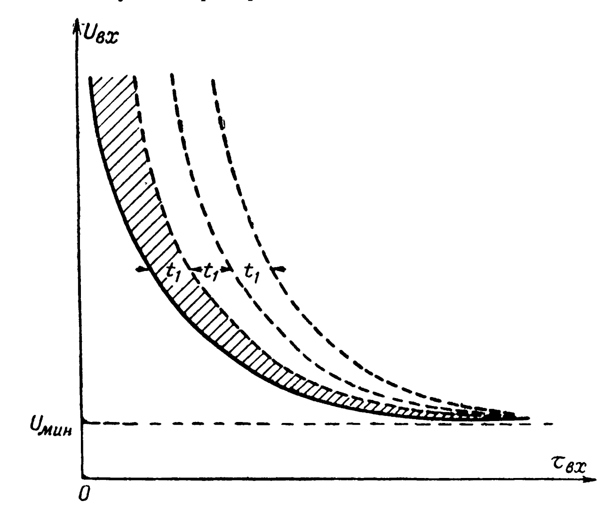


Рис. 30. Области переключений при подаче одиночных управляющих импульсов.

подробно время переключения будет рассмотрено в следующем параграфе.

Из анализа кривых, представленных на рис. 30, можно сделать вывод, насколько высокие требования предъявляются к стабильности параметров одиночных управляющих импульсов. Необходимо отметить, что приведенные кривые в некоторой степени зависят и от формы управляющих импульсов. Чем ближе форма импульсов будет к прямоугольной, тем большее быстродействие может быть получено и тем надежнее происходит переключение при тех же допусках на стабильность параметров импульсов.

Схемы, в которых все десять управляющих электродов (пластин) соединены вместе непосредственно, применяются довольно редко вследствие низкой надежности переключения на одну камеру от каждого импульса. Основными преимуществами таких схем являются простота и экономичность формирователя.

Там, где быстродействие не играет решающей роли, могут применяться схемы объединения управляющих электродов (или пла-

стин) через RC цепочки (см. рис. 13). В этом случае длительность управляющих импульсов является уже не столь критичным параметром. Она должна лишь быть больше, чем время переключения, и меньше некоторой величины, определяемой параметрами RC цепочек. Требования к стабильности амплитуды импульсов также значительно ниже. В целом эта схема более надежна, чем схема с непосредственным соединением управляющих электродов.

На рис. 31 приведена схема формирователя одиночных управляющих импульсов на блокинг-генераторе. Для уменьшения выброса обратной полярности и для подбора амплитуды выходного сигнала последний снимается со специального сопротивления R_a, величина которого обычно составляет несколько сотен ом. При этом амплитуда выходного импульса может изменяться в пределах до 100 *в*. Подключение емкости нагрузки порядка 10—20 *пф* к такому низкоомному сопротивлению не сказывается на длительности выходного импульса. Запуск схемы производится через отдельный триод.

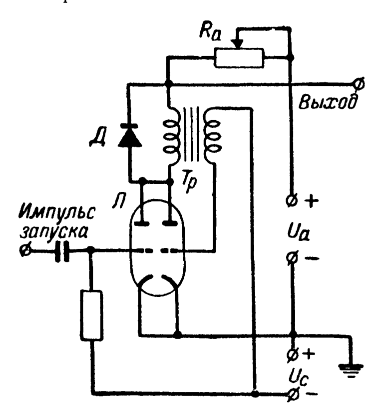


Рис. 31. Схема формирователя одиночных управляющих импульсов на блокинг-генераторе.

При конструировании формирователей необходимо обращать особое внимание на уменьшение времени восстановления, так как разрешающее время комбинации формирователь — трохотрон чаще всего ограничивается возможностями формирователя.

В схеме блокинг-генератора, приведенной на рис. 31, время восстановления определяется параметрами трансформатора *Тр*. Для уменьшения времени восстановления применено демпфирование анодной обмотки с помощью полупроводникового диода *Д*. Очень важно, чтобы в сеточной цепи блокинг-генератора не было переходных емкостей, заряжаемых сеточными токами (эти емкости часто применяют для точной подгонки длительности импульсов блокинг-генератора). В данной схеме длительность импульса определяется лишь параметрами трансформатора и лампы и точной подгонки длительности при регулировке нет. Однако в формирователях для трохотронов вместо подгонки длительности можно применять подгонку амплитуды импульсов.

В качестве формирователей одиночных управляющих импульсов могут применяться и другие импульсные схемы (например, генератор с контуром ударного возбуждения и др.). Однако наибольшее распространение получили схемы блокинг-генераторов как самые простые и экономичные.

Формирователи двухтактных импульсных сигналов. Обычно двухтактные импульсные сигналы снимаются с анодов ламп триггера непосредственно или через катодные повторители и подаются на две группы управляющих электродов трохотрона. В одну группу соединяются все нечетные управляющие электроды (пластины),

а в другую — все четные. Когда на одной группе управляющих электродов напряжение падает ниже напряжения переключения $U_{пер}$, то на другой одновременно напряжение возрастает до величины, которая должна быть больше половины напряжения источника питания цепей лопаток $U_{ло}$. Величина $U_{пер}$ близка к напряжению катода. Поэтому перепады напряжений, снимаемые с триггера, должны быть приблизительно равны $U_{ло}/2$. Обычно эта величина составляет 50—80 *в*.

Переключение пучка в трохотроне при двухтактном импульсном управляющем сигнале может произойти от каждого входного импульса лишь на одно положение. Такой способ переключения обес-

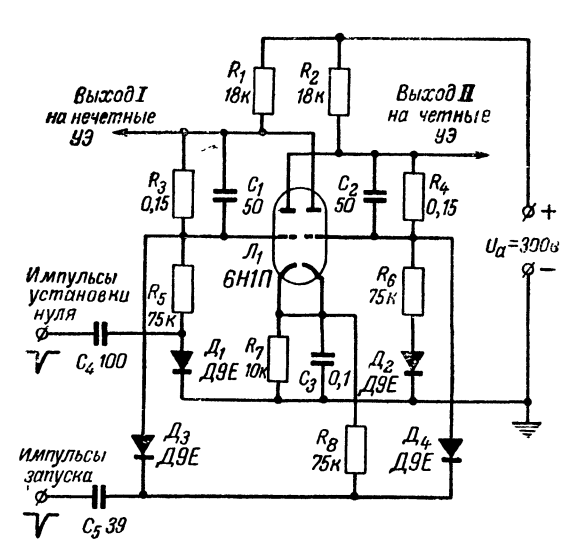


Рис. 32. Схема формирователя двухтактного импульсного управляющего сигнала.

печивает надежную работу трохотрона. Поэтому применение триггеров в качестве формирователей получило наибольшее распространение. При этом следует отметить, что триггеры здесь не служат для деления частоты входных импульсов в 2 раза, как это имеет место в двоичных счетчиках, где выходной импульс снимается с одного из анодов лампы триггера двоичного делителя. В данном случае выходные сигналы снимаются сразу с двух анодов ламп и подаются на две группы управляющих электродов. От каждого входного импульса триггер изменяет свое состояние, а пучок в трохотроне переключается на одно положение.

Схемы триггеров широко известны. На рис. 32 показана схема триггера, используемая в качестве формирователя при скоростях переключения порядка 1 *Мгц*. Перед началом работы триггер устанавливается в нулевое положение одновременно с установкой пучка трохотрона в нулевое положение. Для того чтобы пучок мог быть

устойчиво заблокирован в нулевой камере, необходимо на управляющем электроде этой камеры иметь наибольшее значение потенциала, т. е. нулевое положение триггера должно соответствовать запертому левому (по схеме) триоду.

Импульсы запуска подаются сразу на обе сеточные цепи. Триггер более чувствителен к импульсам отрицательной полярности. Для улучшения условий переброса сопротивления связи R_3 и R_4 шунтируются небольшими емкостями C_1 и C_2. Эти емкости должны в несколько раз превышать сумму входной статической емкости лампы $C_{с\text{-}к}$ и динамической входной емкости лампы $C_д$, обусловленной влиянием проходной емкости $C_{а\text{-}с}$.

Величина динамической входной емкости подсчитывается по формуле

$$C_д = C_{а\text{-}с}\,(1+K),$$

где K — коэффициент усиления одного плеча триггера. Общая входная емкость одной лампы

$$C_{вх} = C_{с\text{-}к} + C_{а\text{-}с}\,(1+K).$$

Для изоляции схемы триггера от цепи запуска служат диоды $Д_3$ и $Д_4$. Импульс запуска поступает только на сетку открытой лампы, что вызывает надежное опрокидывание схемы триггера.

Быстродействие триггера определяется в основном временем, требуемым для окончания переходных процессов на анодах лампы Постоянная времени цепи формирования нарастающего фронта на аноде запирающейся лампы приблизительно равна

$$\tau_н \approx R_1 (C_1 + C_{вых}),$$

где C_1 — емкость связи;
$C_{вых}$ — выходная емкость лампы;
R_1 — сопротивление анодной нагрузки ($R_1 = R_2$).

Емкость $C_{вх}$ другой лампы не входит в это выражение, так как она шунтирована малым сопротивлением участка сетка—катод.

Для уменьшения постоянной времени $\tau_н$ надо стараться уменьшить емкости связи и величины анодных сопротивлений. Однако при уменьшении емкости связи, когда она становится приблизительно равной общей входной емкости лампы $C_{вх}$, запуск становится нечетким. С другой стороны, минимальное значение анодного сопротивления определяется необходимыми величинами перепадов напряжений:

$$R_{а.мин} \approx \frac{U_{л0}}{2I_0},$$

где I_0 — максимальный ток открытой лампы.

Таким образом, постоянную времени $\tau_н$ можно выразить через параметры лампы следующим образом:

$$\tau_н \approx \frac{U_{л0}\,[C_{вых} + mC_{с\text{-}к} + mK\,(1 + C_{а\text{-}с})]}{2I_0},$$

где m — постоянный коэффициент, показывающий, во сколько раз емкости связи должны быть (для устойчивого запуска) больше входных емкостей (обычно принимают $m = 1{,}5$—3).

Постоянная времени цепи формирования спадающего фронта на аноде открывающейся лампы

$$\tau_c = (C_{вых} + C_{с\text{-}к}) \frac{R_{а\text{-}к} R_а}{R_{а\text{-}к} + R_а},$$

где $R_{а\text{-}к}$ — сопротивление лампы между выводами анода и катода по постоянному току.

Следует отметить, что постоянная времени $\tau_н$ обычно в несколько раз больше $\tau_с$ и именно величина $\tau_н$ определяет быстродействие триггера.

Для повышения быстродействия триггеров могут быть применены следующие способы:

1. *Выбор ламп триггера* с большими величинами токов и малыми междуэлектродными емкостями. Особое значение имеет умень-

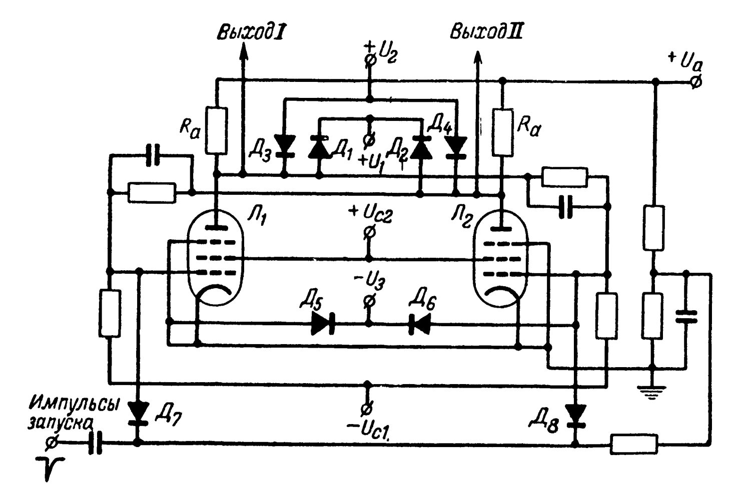


Рис. 33. Схема триггера с фиксирующими диодами.

шение проходной емкости $C_{а\text{-}с}$. Поэтому в быстродействующих триггерах находят применение пентоды.

2. *Использование фиксирующих диодов* для уменьшения пределов изменения напряжения на анодах ламп. На рис. 33 приведена схема, позволяющая получать разрешающее время до 0,1 *мксек.*

Напряжение питания $U_а$ выбирается в несколько раз большим, чем требуемая величина перепадов. Если не поставить фиксирующих диодов, то длительности нарастающего и спадающего фронтов будут определяться только постоянными времени $\tau_н$ и $\tau_с$, формулы для которых были приведены выше. Длительности нарастающего и спадающего фронтов в этом случае приблизительно в 3 раза больше величин $\tau_н$ и $\tau_с$ соответственно. Амплитуда перепадов на анодах близка к значению $U_а$.

Фиксирующие диоды $Д_1$ и $Д_2$ ограничивают верхнее значение напряжения на анодах ламп. Как только напряжение на аноде одной из ламп нарастает до значения U_1, начинает идти ток через один из диодов ($Д_1$ или $Д_2$) и напряжение на аноде не может подняться выше этого значения.

Диоды $Д_3$ и $Д_4$ ограничивают аналогичным образом величину минимального напряжения на анодах. В результате действия диодов $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ и $Д_4$ амплитуда выходных напряжений будет равна величине разности потенциалов $U_1—U_2$.

Форма напряжения на аноде одной из ламп в случае фиксации уровней диодами показана на рис. 34 сплошной линией. Из рассмотрения этого рисунка видно, что длительность нарастающего и спадающего фронтов сокращается при увеличении отношения

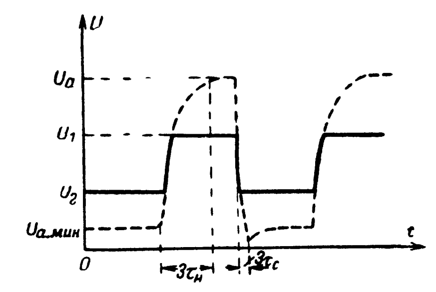


Рис. 34. График напряжения на аноде лампы триггера.

$$\frac{U_a}{U_1 - U_2}.$$

Диоды $Д_5$ и $Д_6$ в сеточных цепях служат для ограничения отрицательного перепада уровнем, несколько превышающим напряжение запирания ламп, т. е. $|U_3| > |U_{зап}|$. Уменьшение перепадов в сеточных цепях также уменьшает время восстановления этих цепей после опрокидывания схемы, что повышает общее скородействие.

Диоды $Д_7$ и $Д_8$ выполняют обычные функции отделения сеточных цепей триггера от цепи запуска.

3. *Использование в цепях связи катодных повторителей.* При этом время восстановления уменьшается вследствие малых значений входной емкости и выходного сопротивления катодного повторителя. Схема триггера с межкаскадными катодными повторителями приведена на рис. 35. Лампы $Л_2$ и $Л_3$ включены по обычной схеме триггера с автоматическим смещением в катоде. Катодные повторители собраны на лампах $Л_1$ и $Л_4$. Включение их в цепи связи позволяет уменьшить емкости C_1 и C_2 до 15—20 *пф*, т. е. уменьшить постоянную времени $\tau_н$. Такая схема позволяет получить разрешающее время до 0,1 *мксек*.

Следует отметить, что во всех приведенных выше схемах триггеров реальное быстродействие с учетом емкостей нагрузки, которые, как уже отмечалось, составляют для каждой из двух групп управляющих электродов 10—25 *пф*, может быть повышено при применении буферных катодных повторителей, подключаемых к выходам триггеров. При этом из-за малой величины добавляемой емкости постоянные времени $\tau_н$ и $\tau_с$ увеличиваются незначительно.

4. *Триггер с динамическими анодными нагрузками.* Схема триггера приведена на рис. 36. Лампы $Л_1$ и $Л_2$ включены обычным образом. Лампы $Л_3$ и $Л_4$ являются динамическими анодными нагрузками для ламп $Л_1$ и $Л_2$. Величина внутреннего сопротивления по постоянному току ламп $Л_3$ и $Л_4$ не является постоянной, а изме-

няется в зависимости от режима ламп $Л_1$ и $Л_2$. Например, в том состоянии триггера, когда лампа $Л_1$ заперта, лампа $Л_3$ работает с нулевым смещением, так как при отсутствии тока через лампу $Л_1$ падение напряжения на сопротивлении $R_{к1}$ равно нулю. Когда же лампа $Л_1$ открыта и через нее течет некоторый ток $I_{а1}$, смещение на сетке лампы $Л_3$ равно $I_{а1}R_{к1}$. Величину $R_{к1}$ следует выбирать по требуемому значению перепадов напряжения на выходах триггера. Обычно величины сопротивлений $R_{к1}$ и $R_{к2}$ составляют несколько сотен ом.

Применение в качестве нагрузок ламп $Л_3$ и $Л_4$ позволяет значительно уменьшить постоянную времени $\tau_н$, так как для распре-

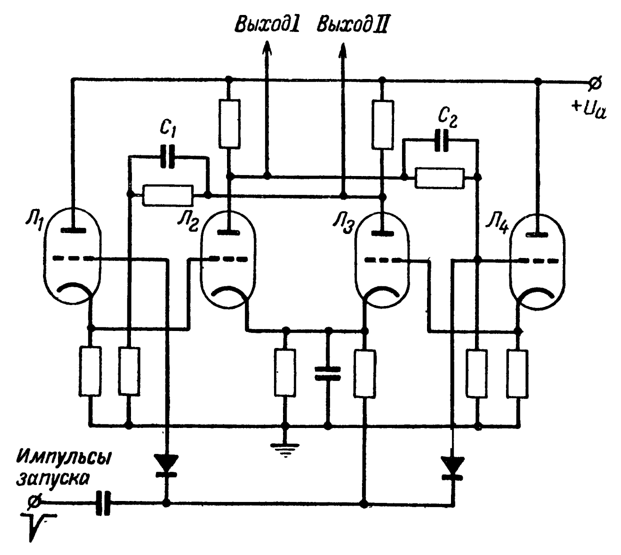


Рис. 35. Схема триггера с межкаскадными катодными повторителями.

деленных емкостей в точках съема лампы $Л_3$ и $Л_4$ во время заряда емкостей работают как катодные повторители с малым выходным сопротивлением (порядка $1/S$).

Разряд же распределенных емкостей происходит через лампы $Л_1$ и $Л_2$. Влиянием сопротивлений $R_{к1}$ и $R_{к2}$ на постоянную времени разряда емкостей τ_c можно пренебречь ввиду малого значения этих сопротивлений по сравнению с внутренним сопротивлением ламп $Л_1$ и $Л_2$.

Фиксирующие диоды $Д_1$ и $Д_2$ не позволяют выходному напряжению подняться выше значения $+U_1$. Величину минимального уровня выходного напряжения следует подбирать с помощью сопротивлений $R_{к1}$ и $R_{к2}$.

Приведенная схема позволяет получать высокое быстродействие (порядка 8—10 *Мгц*). При этом остаются в силе все соображения по выбору ламп, приведенные выше.

Формирователи двухтактного синусоидального сигнала. В отличие от формирователей управляющих сигналов импульсного типа, которые имеют внешний запуск и способны производить как периодическое, так и непериодическое переключение пучка в трохотроне, формирователи двухтактного синусоидального сигнала могут применяться лишь в тех схемах, где пучок в трохотроне должен переключаться периодически. Примерами таких схем, как это будет показано ниже, могут служить различные коммутаторы, счетные

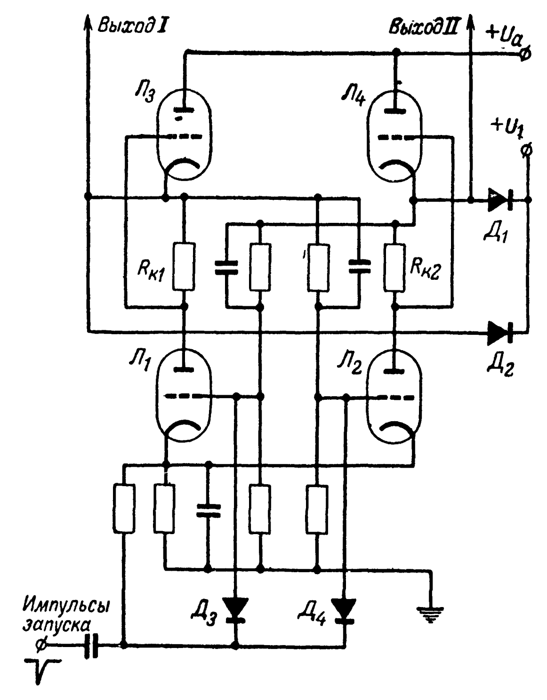


Рис. 36. Триггер с динамическими анодными нагрузками.

устройства, применяемые для оцифровки временны́х интервалов или в дискретных измерителях частоты, и т. п.

Двухтактный синусоидальный сигнал можно получить из однотактного с помощью трансформатора. На рис. 37,*а* показана схема входной цепи трохотрона с формирователем двухтактного синусоидального управляющего сигнала на трансформаторе.

Делитель на сопротивлениях R_1, R_2 и R_3 служит для обеспечения надежного режима блокировки пучка в любой камере трохотрона в отсутствие управляющего сигнала. Как уже отмечалось, разность потенциалов U_1—U_2 должна быть равна или больше $U_0/2$. Сопротивление R_3 служит также сопротивлением отрицательной

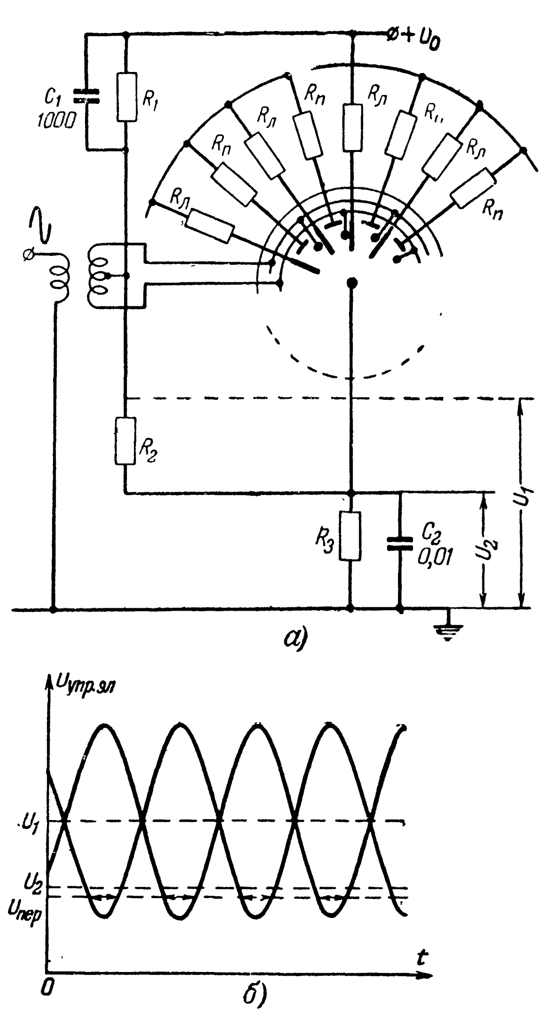


Рис. 37. Схема входной цепи трохотрона с двухтактным управляющим синусоидальным сигналом (*а*) и эпюра напряжений на управляющих электродах (*б*).

обратной связи по постоянному току, которая позволяет уменьшить влияние нестабильности источников питания, а также изменения параметров при переходе от образца к образцу.

На выходной обмотке формирующего трансформатора амплитудное значение напряжения должно быть несколько больше разности потенциалов $U_1—U_2$ (обычно эта величина равна 50—80 *в*).

При работе с большими скоростями переключения амплитуду синусоидального напряжения на выходе трансформатора желательно увеличить. Это приведет к увеличению промежутка времени, в течение которого напряжение на управляющих электродах лежит ниже уровня переброса пучка (рис. 37,*б*). Следовательно, отводится бо́льшее время на процессы, связанные с перезарядом паразитных емкостей электродов трохотрона, что, в конце концов, и обеспечивает возможность поднять частоту переключения.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ТРОХОТРОНОВ В ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКЕ

10. ПЕРЕСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ТРОХОТРОНАХ

Для счета импульсов во многих областях физики и радиоэлектроники применяют различные пересчетные устройства. Пересчетные устройства на трохотронах имеют целый ряд преимуществ. Трохотроны позволяют получать высокое быстродействие. Это в особенности относится к кольцевым трохотронам, скорости счета для которых доходят до 5 *Мгц* и выше. Следует отметить, что наиболее наглядный отсчет получается в десятичных пересчетных устройствах.

Трохотроны имеют, как правило, по десять камер, и каждый трохотрон со своим формирователем является, по сути дела, пересчетной декадой. Некоторые типы трохотронов обеспечивают индикацию нахождения пучка в камере без дополнительных цепей путем нанесения флуоресцирующего слоя на торцовые части пластин. Схема пересчетной декады на трохотроне отличается простотой и высокой надежностью.

Надежность трохотрона, как правило, выше, чем надежность электронных ламп, вследствие отсутствия в трохотроне элементов, подобных сеткам ламп. По надежности декады на трохотронах могут конкурировать с пересчетными декадами на транзисторах, в которые входит обычно около десятка транзисторов и столько же полупроводниковых диодов.

На рис. 38 приведена схема пересчетной декады на кольцевом трохотроне. Триггер, применяемый в качестве формирователя двухтактного импульсного переключающего напряжения, уже был описан выше. Перепады напряжения с анодов лампы триггера могут подаваться на управляющие электроды трохотрона непосредственно или через переходные емкости. В любом случае необходимо, чтобы в отсутствие переключающего сигнала потенциал управляющих электродов был равен или был несколько выше половины потенциала,

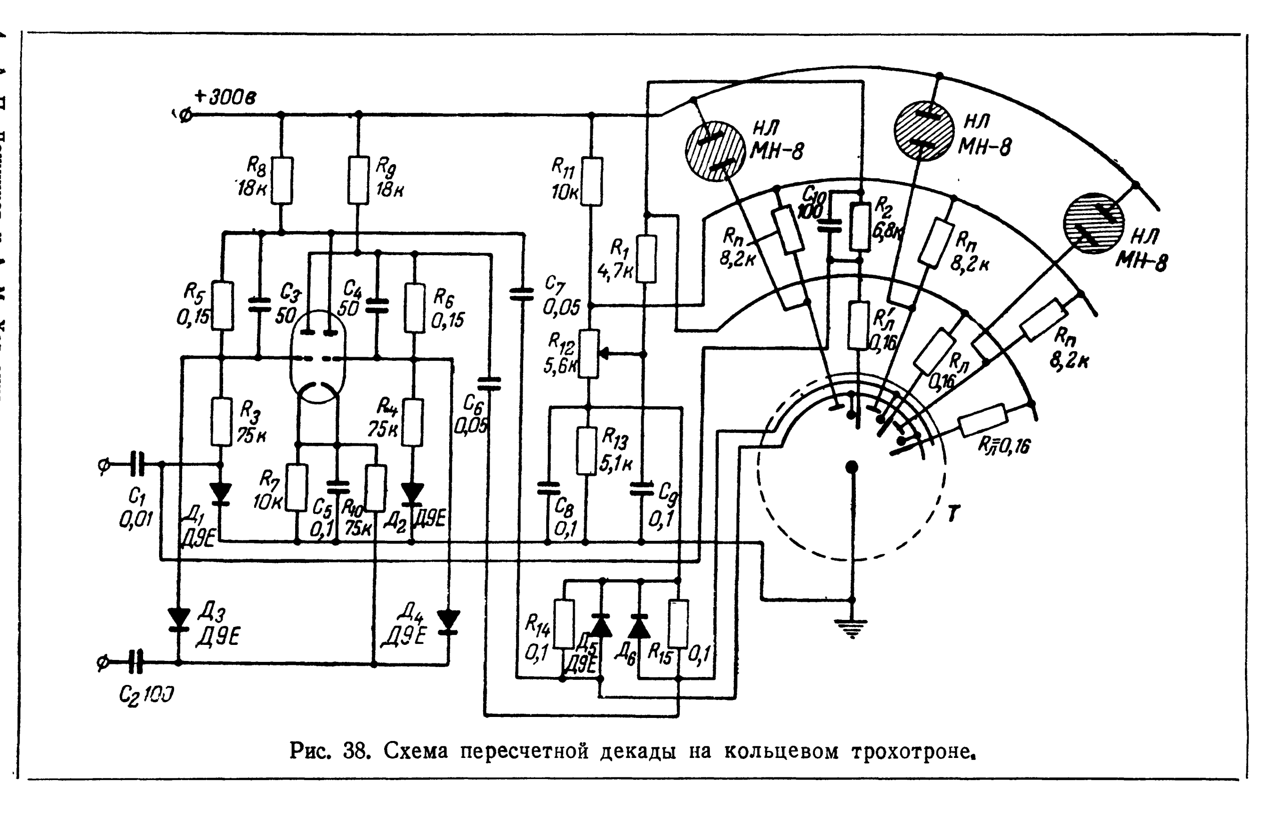


Рис. 38. Схема пересчетной декады на кольцевом трохотроне.

подаваемого на лопатки, а при подаче отрицательного перепада на одну из групп управляющих электродов (четную или нечетную) их потенциал должен опускаться ниже потенциала переброса $U_{пер}$.

Если триггер имеет непосредственные связи с управляющими электродами, то необходимо, чтобы катоды лампы триггера были заземлены. В этом случае сетки лампы подключаются к источнику отрицательного смещения. В цепь катода трохотрона при таких связях желательно поставить сопротивление, чтобы поднять потенциал катода трохотрона до уровня, приблизительно равного потенциалу анодов открытых ламп триггера.

В схеме на рис. 38 связи триггера с трохотроном осуществляются через переходные емкости. В такой схеме для триггера не обязательно иметь источник отрицательного напряжения для сеточных цепей, а допустимо применять автоматическое смещение за счет сопротивлений в катодах лампы триггера. Перепады напряжения на анодах, как уже отмечалось, должны быть несколько больше половины напряжения, подаваемого на лопатки. Для данной схемы напряжение, подаваемое на лопатки, составляет около 150 *в*. Поэтому перепады переключающих напряжений должны составлять не менее 75 *в*. Потенциал на управляющих электродах трохотрона в отсутствие переключающих сигналов определяется величинами сопротивлений делителя R_{11}, R_{12}, R_{13} и составляет приблизительно 75 *в*. Диоды $Д_5$ и $Д_6$ служат для фиксации уровня напряжения на управляющих электродах трохотрона.

В цепь лопатки нулевой камеры трохотрона включена цепочка, состоящая из сопротивлений $R'_л$, R_2 и емкости C_{10}. Эта цепочка позволяет производить импульсную установку в нулевую камеру трохотрона. При подаче отрицательного импульса нулевой установки, равного по амплитуде приблизительно 150 *в*, потенциал нулевой лопатки падает до нуля, потенциал на шине питания всех других лопаток вначале также падает до нуля, а затем по мере перезаряда емкости C_{10} током импульса напряжение на шине доходит до уровня, определяемого соотношением сопротивлений R_1 и R_2 и приблизительно равного половине напряжения питания лопаток. Таким образом, при подаче импульса вначале напряжение на всех лопатках падает до нуля и пучок в трохотроне гаснет. Затем потенциал на девяти лопатках, кроме нулевой, поднимается до уровня, приблизительно равного половине питающего напряжения лопаток. Пучок при этом попадает в нулевую камеру, так как на ее лопатке потенциал в течение действия импульса установки равен нулю. После окончания импульса установки пучок остается заблокированным в нулевой камере трохотрона.

Сопротивления $R_л$ в цепи лопаток выбираются по рабочим областям трохотрона, как было показано выше. Сопротивление $R'_л$ может быть взято равным или несколько меньшим, чем $R_л$. Сопротивление R_2 должно быть в 10—20 раз меньше по величине, чем $R_л$. Соотношение величин сопротивлений R_2 и R_1 обычно составляет $R_2/R_1=1,5$.

Емкость конденсатора C_{10} определяется из неравенства

$$R_2C_{10}>R_лC_л,$$

где $C_л$ — распределенная емкость лопатки нулевой камеры, которая обычно составляет несколько пикофарад.

Длительность импульсов нулевой установки определяется значениями емкости C_{10} и сопротивления R_1 и составляет около 1 *мксек.*

Следует заметить, что минимальная амплитуда импульса нулевой установки определяется условиями гашения пучка в трохотроне. Тот потенциал на всех лопатках, при котором пучок гасится, называется потенциалом сброса $U_{сб}$ и зависит для каждого типа трохотронов от величин сопротивлений в цепях лопаток $R_л$. Зависимость, связывающая напряжение сброса и величину $R_л$, приведена на рис. 39. На основании этой зависимости всегда можно найти минимальную амплитуду импульса нулевой установки как

$$U_{уст.мин} = U_{л0} - U_{сб},$$

где $U_{л0}$ — напряжение питания лопаток.

Величина $U_{сб}$, как это будет показано ниже, играет важную роль и при анализе быстродействия схем на трохотронах.

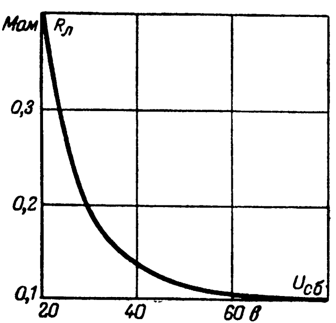


Рис. 39. Зависимость напряжения сброса от величины сопротивлений в цепях лопаток.

Примененный в рассматриваемой схеме трохотрон *T* не имеет внутренней индикации. Поэтому для индикации положения пучка в трохотроне служат десять неоновых ламп *НЛ*. Все эти лампы соединены с зажимом +300 *в*. Сопротивления в цепях всех пластин подключены к точке с потенциалом порядка 250 *в*. Таким образом, на всех неоновых лампах, кроме горящей, всегда имеется начальная разность потенциалов, приблизительно равная 50 *в*. Это напряжение недостаточно для зажигания неоновой лампы. Лампа зажигается, когда потенциал на соответствующей пластине падает за счет тока пучка. Падение напряжения на сопротивлении $R_п$ должно превышать значение

$$U_п = U_{заж} - 50в,$$

где $U_{заж}$ — напряжение зажигания неоновой лампы.

Отсюда выбираются сопротивления в цепях пластин

$$R_п = \frac{U_п}{I_л},$$

где $I_л$ — ток пучка трохотрона.

При выборе этих сопротивлений и напряжений питания цепей пластин необходимо следить за тем, чтобы напряжение на пластинах не понижалось от тока пучка ниже половины напряжения питания лопаток. Иначе надежность работы трохотрона ухудшится за счет увеличения тока утечки.

Выходной импульс декады снимается с пластины нулевой камеры трохотрона. Осциллограммы входных и выходных импульсов пересчетной декады показаны на рис. 40. Описанная декада работает как с периодическими входными импульсами, показанными на

рис. 40, так и с импульсами, статистически распределенными во времени.

Быстродействие описанной декады составляет приблизительно 1 *Мгц* и ограничивается триггером. Обычно пересчетное устройство состоит из нескольких декад. Данная схема может быть использована во всех декадах, если требуемое быстродействие не выше 1 *Мгц*. Если же быстродействие следует увеличить, то необходимо принять описанные выше меры по повышению быстродействия триггера в первой декаде.

Рассмотрим два параметра схемы на трохотроне, характеризующие ее с точки зрения быстродействия. Этими параметрами являются разрешающее время $t_р$, которое представляет собой минимальное время между двумя соседними перепадами переключающего напряжения, при котором пучок в трохотроне переключается на одно положение, и максимальная скорость счета $f_м$ периодических импульсов.

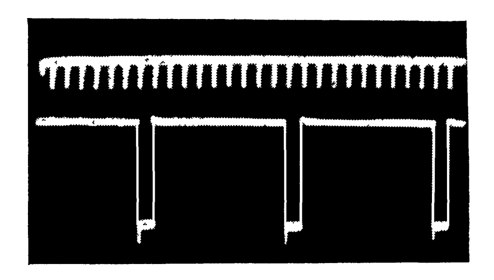


Рис. 40. Осциллограммы входных (вверху) и выходных (внизу) импульсов пересчетной декады.

Знание разрешающего времени наиболее важно при счете статистически распределенных во времени импульсов. Такие импульсы наиболее часто встречаются в различных физических исследованиях, при анализе статистических характеристик флуктуационных процессов и т. п.

Максимальная скорость счета характеризует возможности применения трохотронов в различных схемах дискретной техники: цифровых измерительных приборах, дискретных измерителях частоты, интервала времени и т. п.

Разрешающее время $t_р$ равно времени переключения пучка из одной камеры трохотрона в другую. Оно определяется временем разряда распределенной емкости лопатки $C_л$ от уровня напряжения источника питания лопаток $U_{л0}$ (на лопатке той камеры, куда переключается пучок, напряжение равно $U_{л0}$, поскольку тока в ее цепи до переключения не было) до напряжения U_C, соответствующего точке блокировки на вольт-амперной блокировочной характеристике лопатки. Напряжение U_C обычно лежит в интервале от 0 до —10 *в* в зависимости от величины сопротивления $R_л$ и типа трохотрона.

Процесс разряда емкости $C_л$ можно разбить на два характерных этапа. На первом этапе емкость $C_л$ разряжается полным током пучка $I_л$ от напряжения $U_{л0}$ до некоторого напряжения U_m, соответствующего появлению тока пластины в той камере, куда переключается пучок. Время разряда емкости $C_л$ до напряжения U_m можно определить по формуле

$$t_1 = \frac{C_л (U_{л0} - U_m)}{I_л}.$$

Напряжение U_m находится путем построения, как показано на рис. 41. Для этого в точке блокировки проводится касательная

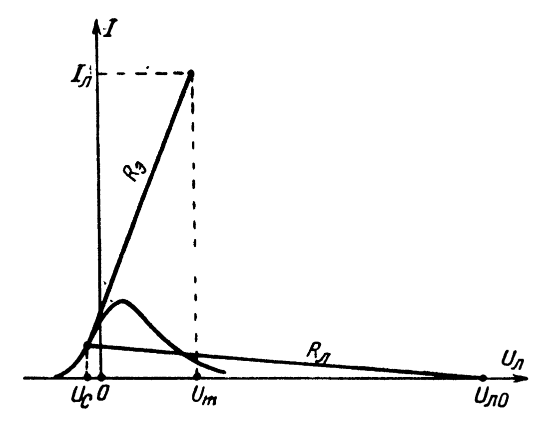


Рис. 41. К расчету скородействия трохотрона.

к вольт-амперной характеристике. Точка пересечения этой касательной с уровнем, соответствующим току пучка $I_л$, и будет величиной U_m.

С момента времени, когда напряжение на емкости $C_л$ достигло величины U_m, разряд происходит не постоянным током, так как ток пучка начинает идти на пластину, а по экспоненциальному закону с постоянной времени

$$\tau_2 = C_л \frac{R_л R_э}{R_л + R_э},$$

где $R_э$ — эквивалентное сопротивление трохотрона (составляет единицы килоом).

Так как $R_э \ll R_л$, то $\tau_2 \approx C_л R_э$, а время второго этапа разряда $t_2 \approx 3 C_л R_э$.

Таким образом, разрешающее время

$$t_р = t_1 + t_2 = \left(\frac{U_{л0} - U_m}{I_л} + 3R_э \right) C_л.$$

Обычно в кольцевых трохотронах t_1 и t_2 равны нескольким сотым долям микросекунды, а $t_р=0,04—0,15$ *мксек.*

Максимальная скорость счета $f_м$ периодических импульсов зависит от того факта, что для десятичного трохотрона пучок должен вернуться в какую-либо камеру через девять периодов и к этому времени емкость $C_л$ лопатки этой камеры должна успеть восстановить заряд в отсутствии тока пучка при постоянной времени цепи, равной $C_л R_л$. Сложность анализа работы на больших скоростях счета, близких к предельным, объясняется тем, что при нахождении пучка в какой-либо камере лопатки остальных камер имеют различные потенциалы от значений, близких к нулю (для лопатки камеры, из которой пучок переключился), и до значений, близких к $U_{л0}$ (на лопатке, расположенной по направлению переключения за данной лопаткой, где в настоящий момент находится пучок).

Известно, что для нормальной работы трохотрона в режиме переключения необходимо, чтобы не менее половины всех лопаток имело потенциал выше, чем потенциал сброса $U_{сб}$ (см. рис. 39).

Напряжение на данной лопатке после переключения пучка из соответствующей ей камеры нарастает по экспоненциальному закону

$$u=(U_{л0}-U_C)\left(1-e^{-\frac{t}{C_л R_л}}\right).$$

Время, через которое напряжение на данной лопатке превысит величину $U_{сб}$, подсчитывается по формуле

$$T=R_л C_л \ln\left[\frac{U_{л0}-U_C}{U_{л0}-U_C-U_{сб}}\right].$$

Так как величины $U_{сб}$ должны достигать не все девять лопаток, а лишь половина (как предельный случай), максимальная частота счета определяется как

$$f_м \approx \frac{5}{T}.$$

Эта формула верна, если $\frac{1}{t_р} > \frac{5}{T}$, что практически всегда имеет место. Если же представить себе случай, когда $\frac{1}{t_р} < \frac{5}{T}$, то максимальная частота

$$f_м=\frac{1}{t_р}.$$

Для кольцевых трохотронов $f_м=2—10$ *Мгц* в зависимости от типа трохотрона и величины $C_л$.

Таким образом, как видно из выражений для $t_р$ и $f_м$, быстродействие зависит от величины паразитных емкостей цепей лопаток.

В некоторых типах кольцевых трохотронов сопротивления $R_л$ размещаются внутри колбы трохотрона. Этим самым емкости $C_л$ снижаются до 1—3 *пф*, что резко повышает быстродействие.

Во многих практических схемах быстродействие ограничивается не трохотроном, а другими схемными элементами. Большое значение имеют величина разрешающего времени формирователя, амплитуда снимамых с него импульсов, а также их форма.

На рис. 42,*а* приведена схема для проверки влияния формы переключающих сигналов на быстродействие. Эта схема отличается от схемы на рис. 38 только цепями управляющих электродов. Схема предназначена для счета периодических импульсов. Амплитуда перепадов с формирователя составляет 90 *в*.

На рис. 42,*б* показаны напряжения на группах управляющих электродов на частоте порядка 1 *Мгц*. Здесь уже заметно, что напряжение не прямоугольное, а близкое к трапецеидальному. Напряжение смещения, показанное на рис. 42,*б*, соответствует режиму устойчивой работы.

Из рис. 42,*б* видно, что время $t_п$, в течение которого потенциал управляющих электродов меньше потенциала переброса, составляет определенную часть периода повторения входных импульсов. Это значит, что при плохой форме переключающих сигналов работа может нарушиться, даже если разрешающее время формирователя и трохотрона меньше периода входных импульсов. Здесь можно идти или на увеличение перепадов, или, при постоянной величине перепадов, понижать смещение. Однако изменять смещение можно лишь в определенных пределах.

На рис. 42,*в* показана снятая экспериментально рабочая область трохотрона для определенного вида переключающих сигналов (таких как на рис. 42,*б*) в зависимости от величины напряжения смещения $U_{см}$. Из рис. 42,*в* видно, что при заданных величинах перепадов и напряжения $U_{л0}$ существуют две границы допустимых изменений напряжения смещения. При уменьшении напряжения смещения за нижнюю границу наступает режим самопереключения пучка из камеры в камеру, так как даже при отсутствии переключающих сигналов напряжение на управляющих электродах оказывается ниже напряжения переброса $U_{пер}$.

На высоких частотах эта граница понижается, так как самопереключение синхронизируется высокой частотой, с которой следуют входные импульсы. Если же требуется обеспечить устойчивую работу во всем диапазоне частот от 0 до $f_м$, то потенциал смещения должен быть не меньше $U_{н.макс}$.

Верхняя граница на низких частотах определяется тем, что потенциал на управляющих электродах при данных перепадах переключающего сигнала не будет опускаться ниже напряжения переброса $U_{пер}$ и, следовательно, будут отсутствовать какие-либо переключения пучка.

На высоких частотах верхняя граница понижается, так как импульсы формирователя имеют не прямоугольную форму, и время $t_п$, в течение которого потенциал на управляющих электродах оказывается ниже потенциала переброса $U_{пер}$, сокращается. Это время может оказаться недостаточным для переброса, поэтому приходится уменьшать величину напряжения смещения $U_{см}$.

В тех устройствах, где требуется работа во всем диапазоне частот, предельная частота $f_м$ соответствует значению, при котором верхняя граница смещения опускается до потенциала, равного $U_{н.макс}$.

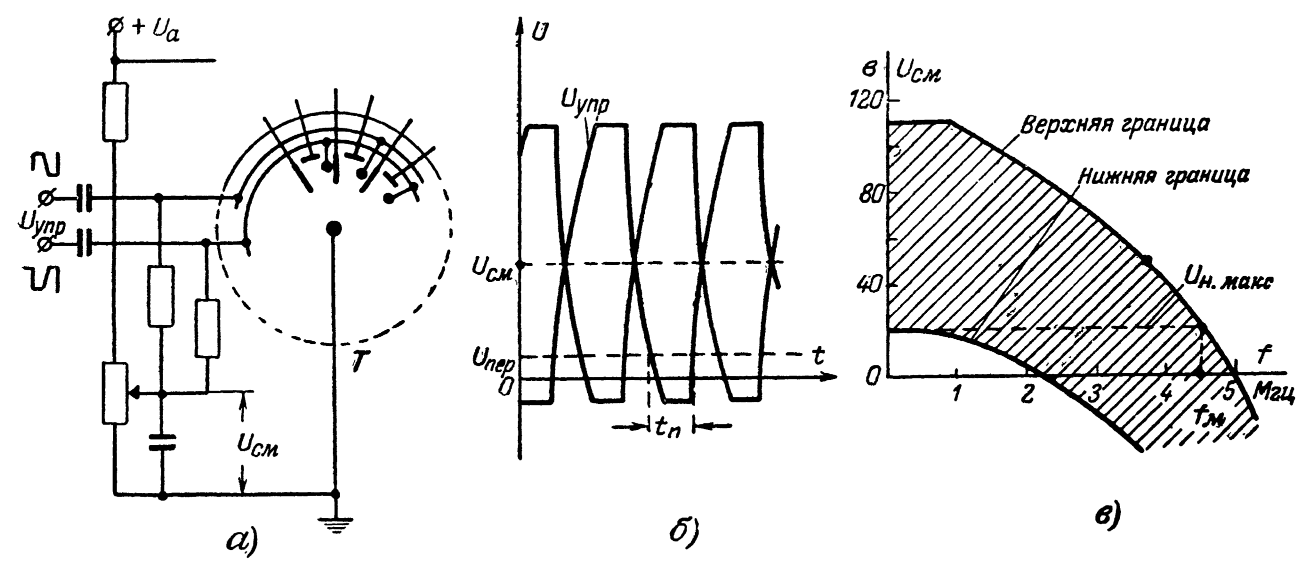


Рис. 42 Схема для проверки влияния формы переключающих сигналов на скородействие (*а*), эпюры напряжений на двух группах управляющих электродов (*б*) и рабочая область трохотрона (*в*).

Уменьшение смещения дает возможность работать на частотах справа от кривой нижней границы, т. е. диапазон нормальной работы сдвигается в область более высоких частот. Но при этом нарушается работа на низких частотах, так как здесь имеет место самопереброс пучка.

В пересчетных устройствах применяются также и линейные трохотроны. Схема пересчетной декады на линейном трохотроне выглядит аналогично схеме декады на кольцевом трохотроне. Разница состоит лишь в том, что вместо управляющих электродов используются пластины (в известных на сегодняшний день линейных трохотронах, в том числе и в отечественном типе ЛП-4, управляющих электродов нет), соединенные схемно в две группы: отдельно пластины четных камер и отдельно нечетных. Индикация осуществляется по падению напряжения на сопротивлениях $R_л$ в цепях лопаток. Выходной импульс декады снимается с анода.

Декады на линейных трохотронах имеют меньшее быстродействие по сравнению с декадами на кольцевых трохотронах. Разрешающее время $t_р$ увеличивается за счет меньших токов пучка. Так, например, в линейном трохотроне ЛП-4 ток пучка составляет около 2 *ма*, в то время как в среднем (по быстродействию) кольцевом трохотроне он равен 8—10 *ма*.

Разрешающее время в линейном трохотроне имеет различное значение в зависимости от номера камеры, в которую переключается пучок. Но наибольшее разрешающее время имеет место при переключении из последней девятой камеры в нулевую, так как этот процесс включает в себя переброс пучка из девятой камеры на анод, затем гашение пучка за счет понижения потенциала на аноде, восстановление заряда на распределенной емкости лопатки девятой камеры и заряд распределенной емкости анода до момента появления пучка, причем момент появления пучка должен наступать после восстановления заряда на емкости лопатки девятой камеры. Иначе пучок не пройдет по каналу до нулевой камеры, а заблокируется вновь в девятую камеру.

Таким образом, результирующее разрешающее время декады на линейном трохотроне определяется наибольшим разрешающим временем (относящимся к процессу переключения пучка из девятой камеры в нулевую) и примерно составляет несколько микросекунд. Максимальная скорость счета периодических импульсов $f_м$ для линейного трохотрона определяется также величиной разрешающего времени $f_м = \frac{1}{t_р}$ и равна около 200 *кгц*.

В последнее время появляются трохотроны, питающиеся от низковольтного источника напряжения ($U_{л0}=25$ *в*). В схемах с такими трохотронами величина переключающих импульсов, которые надо снимать с формирователя для этих трохотронов, как и прежде, приблизительно равна $\frac{U_{л0}}{2} - U_{пер}$, а $U_{пер}$ близко к нулю. Таким образом, ввиду малых амплитуд управляющих сигналов могут быть использованы формирователи на транзисторах. Это повышает надежность и экономичность пересчетной декады в целом.

На рис. 43 приведена схема декады на низковольтном трохотроне типа VS10K с формирователем на транзисторах. Напряжение питания лопаток устанавливается с помощью потенциометра R_{10} и

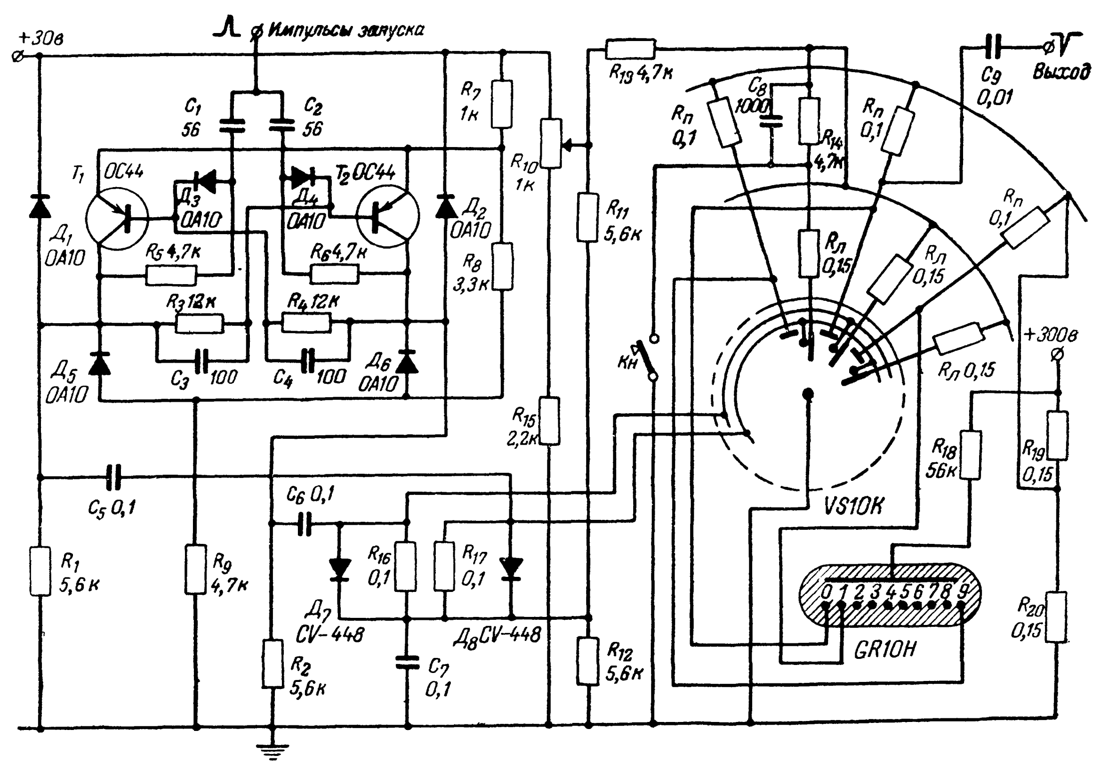


Рис. 43. Схема декады на низковольтном трохотроне.

равно примерно 28 *в*. При этом рабочая область сопротивлений в цепях лопаток составляет 88—220 *ком*. Сопротивления $R_л$ выбираются по 150 *ком*, чтобы попасть в середину рабочей области и тем самым обеспечить максимальную надежность работы схемы.

Схема установки на нуль не отличается от описанной ранее. Установка на нуль осуществляется нажатием кнопки *Кн*. Выходное напряжение снимается с пластин нулевой камеры. Индикация производится с помощью специальной газонаполненной индикаторной лампы типа GR10H. На эту лампу всегда подано начальное напряжение порядка 150 *в*, и лишь при переключении пучка на какую-либо пластину трохотрона напряжение на соответствующем электроде индикаторной лампы еще более понижается и разность потенциалов превосходит напряжение зажигания. Эта схема индикации работает аналогично схеме на неоновых лампах, показанной на рис. 38.

Потенциал управляющих электродов трохотрона равен потенциалу на емкости C_7, который устанавливается приблизительно равным 14 *в* с помощью делителя на сопротивлениях R_{11} и R_{12}. Перепады двухтактного импульсного переключающего напряжения снимаются с коллекторов транзисторов T_1 и T_2. На вход схемы формирователя подаются импульсы запуска положительной полярности.

Быстродействие описанной декады составляет около 200 *кгц*.

На рис. 44 показана еще одна схема формирователя на транзисторах для пересчетной декады, использующей низковольтный трохотрон типа MBS-6701. Триггер здесь выполнен на транзисторах T_1 и T_2, а транзисторы T_3 и T_4 выполняют функции буферных каскадов. На запуск триггера поступают входные импульсы положительной полярности. Эта пересчетная декада имеет разрешающее время 1 *мксек*.

Чтобы показать, насколько широки области применения пересчетных устройств на трохотронах, рассмотрим некоторые применения пересчетных декад.

Как уже отмечалось выше, применение пересчетных устройств на трохотронах для счета статистически распределенных импульсов особенно заманчиво из-за возможности получения десятичной системы счета, визуальной индикации положения пучка в трохотроне и главное из-за малой величины разрешающего времени $t_р$. Еще в 1956 г. авторами на опытных образцах трохотронов было выполнено пересчетное устройство с разрешающим временем 0,2 *мксек* (внешний вид одной из декад этого устройства показан на рис. 45). Эти образцы трохотронов не имели сопротивлений внутри баллона. На трохотронах же, имеющих внутри баллона сопротивления, можно построить еще более быстродействующие пересчетные устройства.

Повышение быстродействия может быть достигнуто некоторыми схемными способами. На рис. 46,*а* показана блок-схема регистрации просчетов в пересчетном устройстве с помощью дополнительного пересчетного устройства, а на рис. 46,*б* приведены эпюры сигналов в различных точках схемы.

Схема работает следующим образом. На эпюре *А* показаны сигналы, которые надо подсчитать. Эти сигналы подаются сразу на три элемента схемы: линию задержки, схему совпадений и схему антисовпадений. На эпюре *А* показаны три импульса, распределенные во времени таким образом, что интервал t_1 между импульсами *1* и *2* больше, а интервал t_2 между импульсами *2* и *3* меньше разрешающего времени $t_р$ пересчетного устройства. Если эти им-

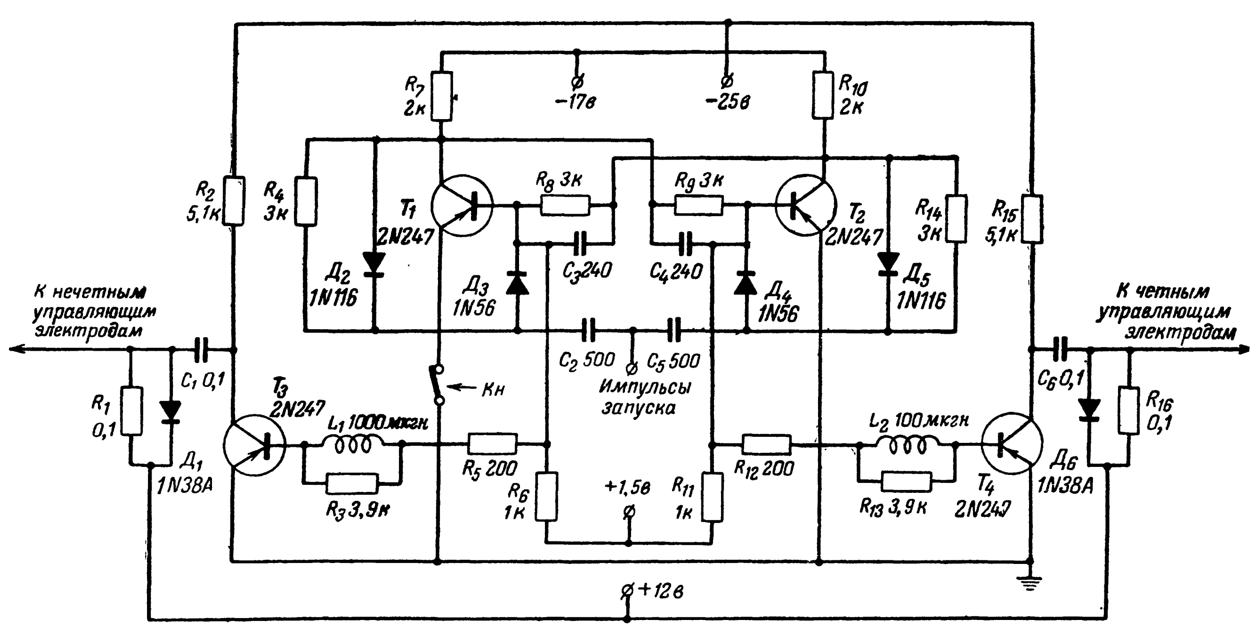


Рис. 44. Схема формирователя на транзисторах для управления низковольтным трохотроном.

пульсы подать сразу на пересчетное устройство *I*, то импульс *3* не будет отсчитан. В данной же схеме этот импульс будет зарегистрирован дополнительным пересчетным устройством *II*.

На эпюре *Б* показаны импульсы, задержанные линией задержки на время $t_{зад}$, примерно равное длительности входных импульсов. Задержанные импульсы подаются далее на вход формирователя, который по каждому входному импульсу вырабатывает расширен-

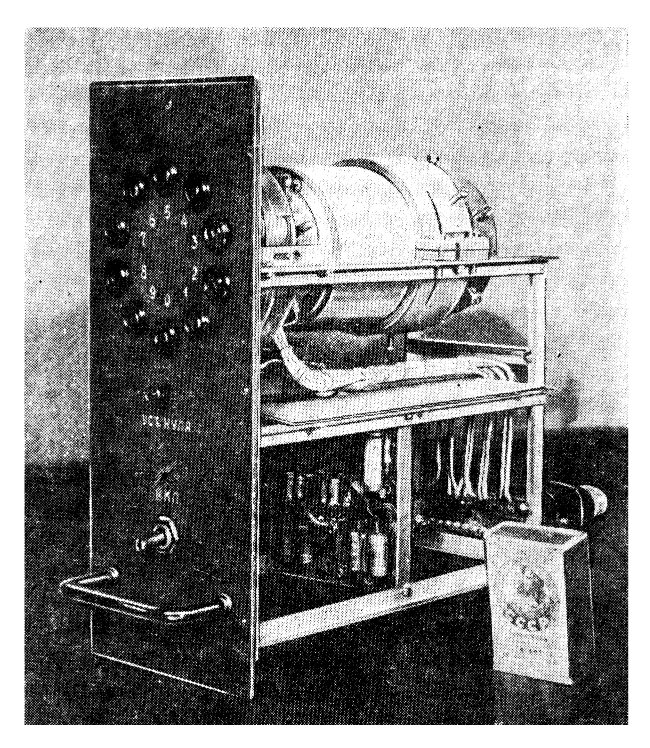


Рис. 45. Внешний вид пересчетной декады на кольцевом трохотроне.

ный импульс, имеющий длительность *T*, несколько бóльшую, чем разрешающее время $t_р$, причем если новый импульс приходит на формирователь в течение времени *T*, то формирователь совершенно не реагирует на такой импульс. Примером этого может служить эпюра *В*, где формирователь запускается импульсами *1* и *2*, а на импульс *3* он не реагирует.

Входные импульсы и импульсы с формирователя подаются на схему совпадений. На эпюре *Г* показаны выходные сигналы схемы совпадений. Из нее видно, что на выходе схемы совпадений имеет место как раз тот импульс *3*, который не мог бы быть зарегистриро-

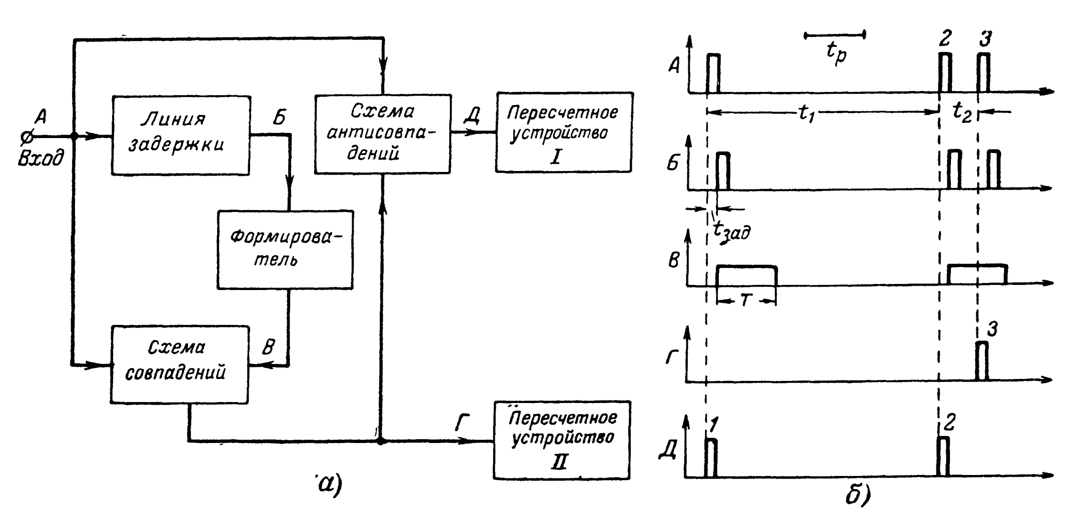


Рис. 46. Блок-схема регистрации просчетов в пересчетных устройствах (*а*) и эпюры сигналов в различных точках схемы (*б*).

ван пересчетным устройством I, если на него подать все входные импульсы. Импульсы со схемы совпадений регистрируются пересчетным устройством II.

Для надежности входные импульсы подаются на пересчетное устройство I не сразу, а через схему антисовпадений, которая исключает регистрацию какого-либо импульса и первым и вторым пересчетными устройствами. Импульсы на выходе схемы антисовпадений показаны на эпюре $Д$.

Таким образом, входные импульсы, подаваемые на схему по одному каналу, распределяются схемой совпадений по двум каналам, связанным со своими пересчетными устройствами.

Просчеты в такой схеме могут наступать лишь при условии, что в промежуток времени T придет больше одного импульса. Количество этих просчетов будет тем больше, чем больше измеряемое число импульсов в единицу времени N_0.

Если через n_0 обозначить число импульсов в единицу времени, проходящих на пересчетное устройство I, то существующую зависимость между n_0 и N_0 можно представить формулой

$$\frac{n_0}{N_0} = \frac{1}{1 + N_0 T}.$$

Количество импульсов n_1, проходящих через схему совпадения на пересчетное устройство II в единицу времени, связано с N_0 формулой

$$\frac{n_1}{N_0} = \frac{n_0}{N_0}\left(1 - e^{-N_0 T}\right).$$

Если при использовании только одного пересчетного устройства количество просчетов равно

$$n_{\text{пр}} = N_0\left(1 - \frac{n_0}{N_0}\right),$$

то при применении описанной схемы число пропусков $n'_{\text{пр}}$ уменьшается и определяется по формуле

$$n'_{\text{пр}} = N_0\left(1 - \frac{n_0}{N_0} - \frac{n_1}{N_0}\right).$$

По приведенным здесь формулам можно рассчитать количество пропусков. Так, например, при $N_0T = 0{,}15$ и $n_{\text{пр}} = 13\%$, число пропусков $n'_{\text{пр}} = 1\%$, а при $N_0T = 0{,}3$ и $n_{\text{пр}} = 23\%$, число пропусков $n'_{\text{пр}} = 3\%$, т. е. число пропусков при применении описанной схемы сокращается примерно на порядок.

Из этих же формул можно найти, что при среднем числе импульсов в секунду $N_0 = 1{,}5 \cdot 10^5$ для подсчета числа импульсов с точностью 1% одним пересчетным устройством следует иметь разрешающее время $t_{\text{р}} = 0{,}07$ *мксек*, а при подсчете этих же импульсов данной схемой от пересчетных устройств требуется разрешающее время 1 *мксек*.

На рис. 47 приведена блок-схема счетчикового частотомера. Напряжение неизвестной частоты f_x подается на формирователь, который вырабатывает импульсы по каждому периоду входного напряжения. Затем эти импульсы попадают на схему совпадений, пропускающую их на пересчетное устройство только в течение образцового

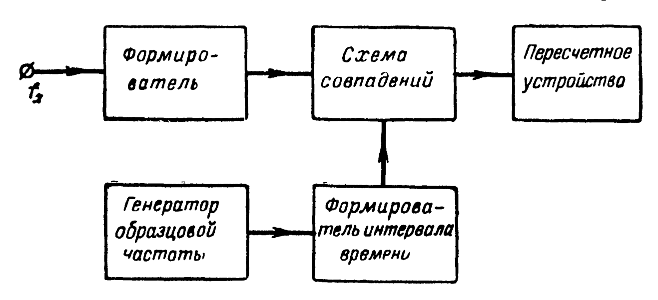


Рис. 47. Блок-схема счетчикового частотомера.

(мерного) интервала времени. В качестве первичного образца времени используется высокостабильный кварцевый генератор. Напряжение с выхода этого генератора после деления частоты служит для получения видеоимпульсов известной длительности. Диапазон

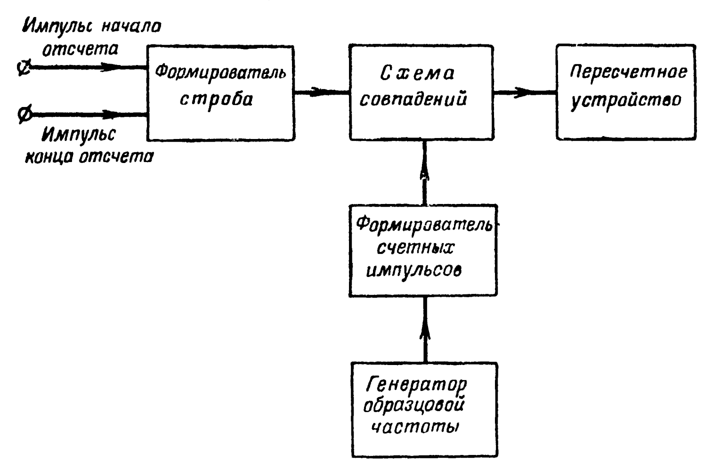


Рис. 48. Блок-схема счетчикового измерителя интервалов времени.

измеряемых частот определяется в основном возможностями пересчетного устройства.

На рис. 48 показана блок-схема счетчикового измерителя интервалов времени. Интервал времени чаще всего определяется двумя импульсами, один из которых соответствует началу, а другой концу

интервала. Эти импульсы подаются на формирователь строба, который вырабатывает видеоимпульс длительностью, равной измеряемому интервалу. Видеоимпульс поступает на схему совпадений, куда подаются и так называемые счетные импульсы. Последние должны иметь стабильную частоту. Поэтому в качестве задающего генератора для их выработки служит кварцевый генератор образцовой частоты.

Точность измерения интервалов времени определяется максимальной скоростью счета $f_м$ пересчетного устройства. Например, интервал времени в 5 *мксек* может быть измерен пересчетным устройством на трохотроне, имеющем $f_м = 5$ *Мгц*, с точностью 4%, а интервал времени в 20 *мксек* — с точностью 1%. Другими словами, при заданной точности измерений быстродействие пересчетного устройства определяет минимальную величину измеряемых интервалов времени.

Измерение интервалов времени встречается и как самостоятельная задача и как промежуточная операция при переводе непрерывных (аналоговых) величин в дискретные. В частности, в большинстве цифровых вольтметров в конечном счете измеряется интервал времени, пропорциональный измеряемому напряжению.

11. КОММУТАТОРЫ

Применение трохотронов особенно целесообразно в таких коммутаторах, в которых необходимо переключать большое количество цепей за короткое время. Коммутаторами на десять положений могут служить описанные выше пересчетные устройства. Необходимо лишь иметь выходы со всех пластин, а на вход формирователя подавать непрерывную последовательность импульсов.

Однако часто возникает задача построения коммутаторов на бо́льшее количество выходов. Одним из методов построения многопозиционного коммутатора может служить последовательное включение и выключение нескольких трохотронов с помощью дополнительных импульсных устройств. После переключения пучка в десятую камеру первого трохотрона импульс с пластины десятой камеры может быть подан на специальный генератор, который вырабатывает импульсы для выключения пучка в первом трохотроне и включения его в первую камеру второго трохотрона.

Импульс выключения может подаваться на сопротивление порядка 1 *ком*, включенное в цепь катода первого трохотрона. Такой импульс должен иметь амплитуду около 150 *в* (несколько более величины $U_{л0}/2$) и длительность порядка 1 *мксек*. Импульс для включения пучка в первую камеру второго трохотрона должен быть отрицательной полярности и иметь длительность от 0,1 *мксек* и более. Он должен подаваться через конденсатор небольшой емкости или через буферный диод цепи запуска на лопатку первой камеры. Требования к амплитуде такого импульса были приведены выше.

После того как пучок во втором трохотроне достигнет десятой камеры, импульс с его десятой пластины подается на запуск другого импульсного генератора, который вырабатывает импульсы выключения пучка во втором трохотроне и включения его в первую камеру третьего трохотрона, и т. д. по кольцу, составленному из трохотронов, причем с последнего трохотрона производится аналогичный переход на первый трохотрон.

Управляющие электроды всех трохотронов соединяются с двумя выходами общего формирователя: все нечетные к одному, а все четные к другому выходу.

При таком способе последовательного включения трохотронов следует при каждом включении пучка в первую камеру какого-либо трохотрона синхронизировать работу формирователя (триггера), подавая на него импульс одновременно с подачей импульса включения. Тогда после включения пучка в первую камеру данного трохотрона пучок будет устойчиво блокироваться в этой камере, так как потенциал группы управляющих электродов, в которую входит управляющий электрод первой камеры, будет иметь верхнее значение. Недостатком описанного способа является необходимость иметь дополнительные импульсные устройства.

На рис. 49 показана схема коммутатора на 16 выходов, выполненная на двух кольцевых трохотронах. Трохотроны соединены друг с другом непосредственно без помощи каких-либо специальных импульсных устройств. Лопатка девятой камеры первого трохотрона соединена с лопаткой первой камеры второго. Эти лопатки имеют общее сопротивление нагрузки. Точно так же соединены вместе и имеют общую нагрузку девятая камера второго трохотрона и первая камера первого.

Сопротивления в цепях лопаток всех камер трохотронов, за исключением десятых камер, выбираются из условий устойчивой блокировки пучка $R_{мин}<R_{л}<R_{макс}$ и обычно равны 0,12—0,18 *Мом*. Сопротивления в цепях лопаток десятых камер $R_{л10}$ выбираются из условия $R_{мин}>R_{л10}>R_{кр}$ и обычно равны 30—50 *ком*. При таком сопротивлении пучок может переключаться в десятую камеру, но блокироваться в ней он не может.

Нечетные управляющие электроды обоих трохотронов соединены с одним, а четные с другим выходом триггера. В начале работы пучок в первом трохотроне устанавливается в первую камеру, пучок во втором трохотроне выключается, а формирователь переводится в такое положение, при котором на аноде лампы, подключенной к нечетным управляющим электродам, управляющее напряжение максимально.

На вход формирователя подается последовательность тактовых импульсов, определяющих время пребывания пучка на каждом выходе коммутатора. Под действием сигналов на управляющих электродах пучок переходит из камеры в камеру первого трохотрона и доходит до девятой камеры. Потенциал на лопатке девятой камеры первого трохотрона, а следовательно, на лопатке первой камеры второго трохотрона понизится примерно до нуля. Этого вполне достаточно для того, чтобы пучок во втором трохотроне заблокировался в первой камере. При изменении полярности управляющих сигналов (следующий период) пучок в обоих трохотронах переключается в следующую камеру.

Так как сопротивление в цепи лопатки десятой камеры взято меньшей величины, чем $R_{мин}$, то пучок в первом трохотроне после переключения не блокируется, и первый трохотрон переходит в состояние магнетронной отсечки (пучок выключен). Одновременно с переключением пучка в первом трохотроне из девятой камеры в десятую пучок во втором трохотроне переключается во вторую камеру. В следующие периоды пучок во втором трохотроне переключается из камеры в камеру до девятой камеры. Потенциал ло-

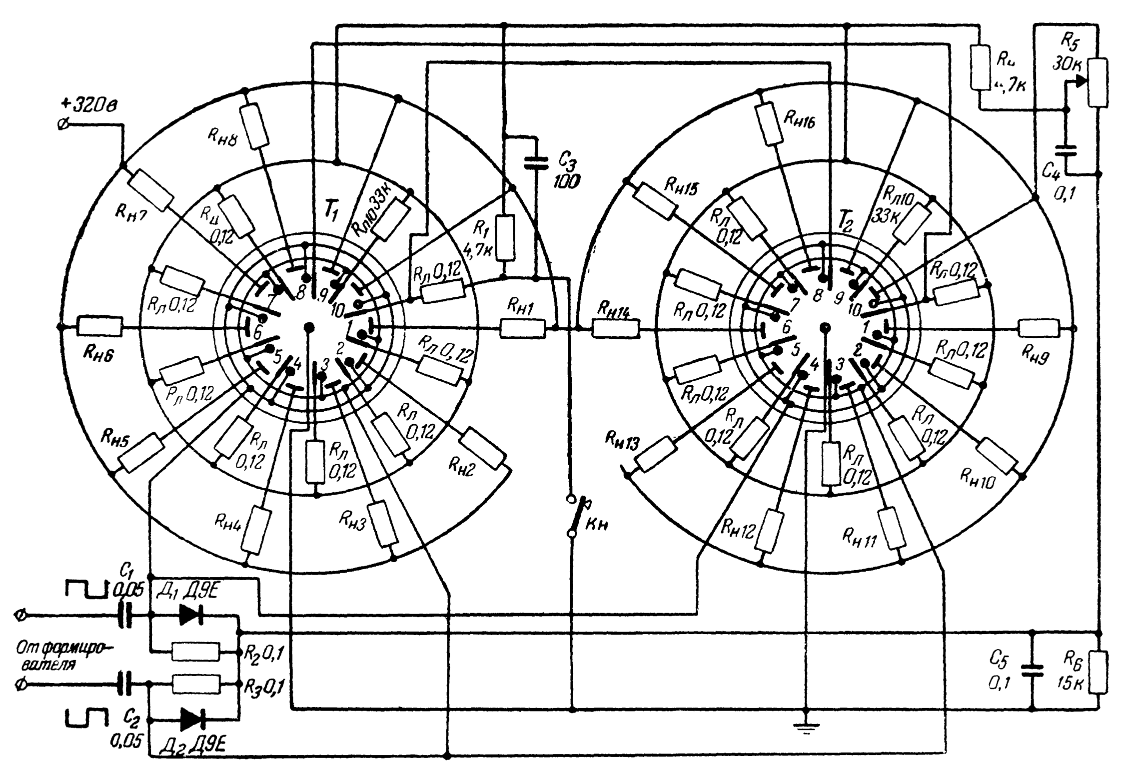


Рис. 49. Схема коммутатора на 16 выходов.

патки девятой камеры второго трохотрона, а также потенциал лопатки первой камеры первого трохотрона падают до нуля. Это вызывает включение пучка в первую камеру первого трохотрона. В следующий период тактовых импульсов пучок во втором трохотроне переключается в десятую камеру и гасится, а пучок в первом трохотроне переключается во вторую камеру. Далее цикл работы повторяется.

Таким образом, пучок последовательно переключается в восемь камер (с первой по восьмую) первого трохотрона, а затем в восемь камер (с первой по восьмую) второго трохотрона. В результате получаем 16 выходов.

Аналогичным образом может быть соединено любое число трохотронов. Число выходов коммутатора может быть подсчитано по формуле

$$N=8n,$$

где N — число выходов;

n — число трохотронов.

На рис. 50 приведена схема коммутатора на 18 выходов. Здесь сопротивления в цепи лопаток десятых камер обоих трохотронов выбираются малой величины, как и в предыдущей схеме. Пучок переключается из девятой камеры в десятую, но не блокируется в ней. На выходе десятой камеры, до того как пучок погасится, имеется отрицательный импульс, длительность которого зависит от времени переключения и выключения пучка и составляет десятые доли микросекунды.

Импульс с пластины десятой камеры первого трохотрона подается на лопатку первой камеры второго трохотрона, что приводит к включению и блокировке пучка в этой камере. Далее пучок во втором трохотроне под воздействием управляющих сигналов переключается до десятой камеры, после чего одновременно включается и блокируется пучок в первой камере первого трохотрона и выключается пучок во втором трохотроне. Таким образом, два трохотрона работают последовательно, причем используются по 9 выходов каждого трохотрона, т. е. всего 18 выходов.

Управляющие электроды четных камер первого трохотрона соединяются с управляющими электродами нечетных камер второго трохотрона, и наоборот. Это необходимо потому, что пучок находится в отдельные моменты времени одновременно в десятой камере первого трохотрона и в первой камере второго. Следовательно, управляющие электроды этих камер должны управляться перепадами напряжения в одной фазе. Для выполнения этого требования при большом числе соединенных последовательно трохотронов можно брать только четное число трохотронов. Максимальное число выходов коммутатора при этом будет равно $N=9\,n$.

Обе последние схемы были экспериментально испытаны на опытных образцах кольцевых трохотронов. Максимальная частота тактовых импульсов составляла 500 *кгц* и определялась быстродействием триггера. Сама схема на трохотронах позволяла иметь частоту переключений до нескольких мегагерц. Для достижения такой частоты необходимо было принять меры по повышению быстродействия формирователей, описанные выше.

Существенного повышения многопозиционности коммутаторов можно добиться при использовании матричных схем совпадений, подключенных к двум трохотронам. На рис. 51 показана функцио-

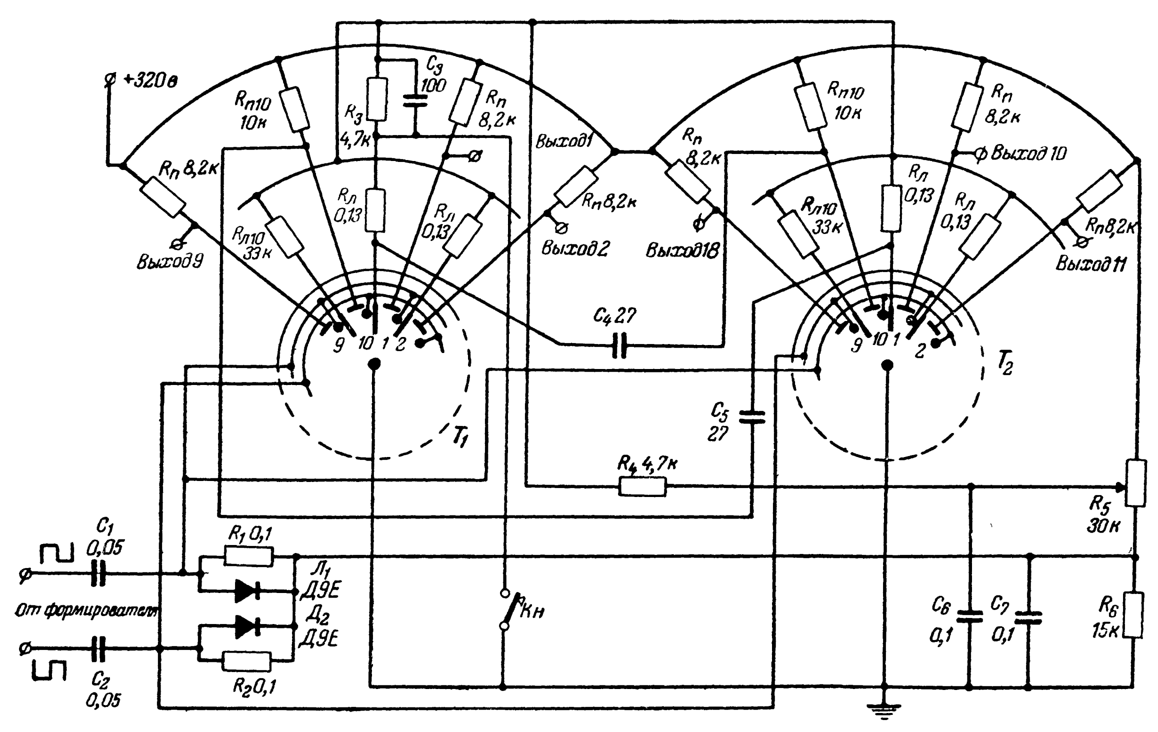


Рис. 50. Схема коммутатора на 18 выходов.

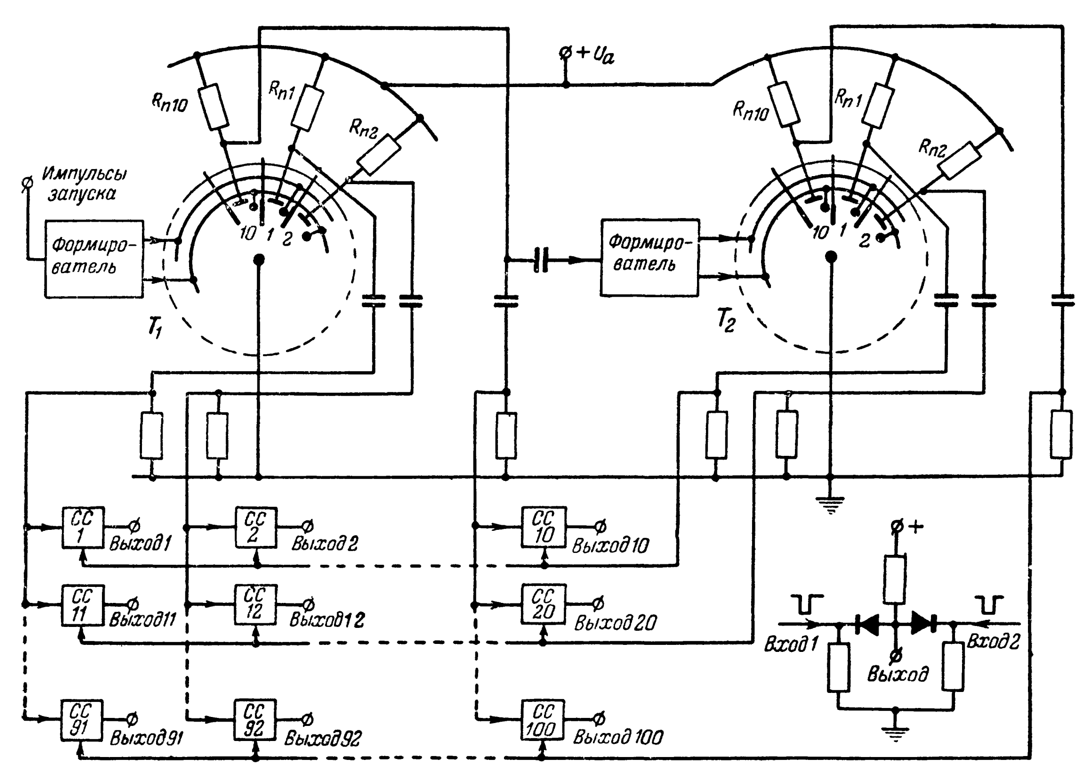


Рис. 51. Функциональная схема матричного коммутатора.

нальная схема матричного коммутатора на кольцевых трохотронах (трохотроны на схеме показаны условно). Схема включения трохотронов аналогична схеме двухдекадного пересчетного устройства. Пучок в трохотроне T_2 переходит в соседнюю камеру после десяти его переключений в трохотроне T_1. Отрицательные импульсы с нагрузочных сопротивлений в цепях пластин подаются на 100 схем совпадений, каждая из которых состоит из двух диодов (показана справа внизу на рис. 51). На выходе схем совпадений *СС* импульс появляется последовательно через равные интервалы времени (в случае запуска первого формирователя периодическими импульсами).

В качестве коммутаторов могут применяться и бинарные трохотроны. На рис. 52 приведена схема коммутатора на бинарном трохотроне с последовательным прямым обходом выходных цепей. Положение пучка в бинарном трохотроне указано в табл. 1. Из нее

Таблица 1

Потенциалы на группах лопаток, *в*			Положение пучка в трохотроне (номер пластины)	Потенциалы на группах лопаток, *в*			Положение пучка в трохотроне (номер пластины)
Короткие лопатки	Средние лопатки	Длинные лопатки		Короткие лопатки	Средние лопатки	Длинные лопатки	
110	110	110	$П_1$	110	110	—40	$П_5$
—40	110	110	$П_2$	—40	110	—40	$П_6$
110	—40	110	$П_3$	110	—40	—40	$П_7$
—40	—40	110	$П_4$	—40	—40	—40	$П_8$

видно, что для последовательного прямого обхода выходных цепей необходимо подключать три группы лопаток к трем триггерам, осуществляющим бинарное деление.

Входные импульсы запускают триггер на лампе $Л_1$. Импульсы с выхода этого триггера подаются на группу коротких лопаток (амплитуда импульсов на выходе триггера должна быть несколько более 150 *в*). Они передаются через переходную емкость и схему фиксации уровня +110 *в*, которая работает аналогично таким же схемам, описанным выше. Следует заметить, что данная схема фиксации с переходными емкостями работает только при периодически приходящих входных импульсах, т. е. когда требуется последовательный обход выходных цепей коммутатора. Емкость переходных конденсаторов и сопротивлений, шунтирующих диоды, выбирается, исходя из длительности периода входных импульсов. Если необходимо, чтобы пучок в бинарном трохотроне оставался неограниченно большое время в какой-либо камере, то выходы триггера надо связать с группами лопаток непосредственно, а все потенциалы электродов трохотрона соответственно поднять так, чтобы потенциал на аноде трохотрона был равен напряжению источника питания триггеров.

Триггеры на лампах $Л_1$, $Л_2$ и $Л_3$ устанавливаются в исходное состояние с помощью отрицательных импульсов установки. При

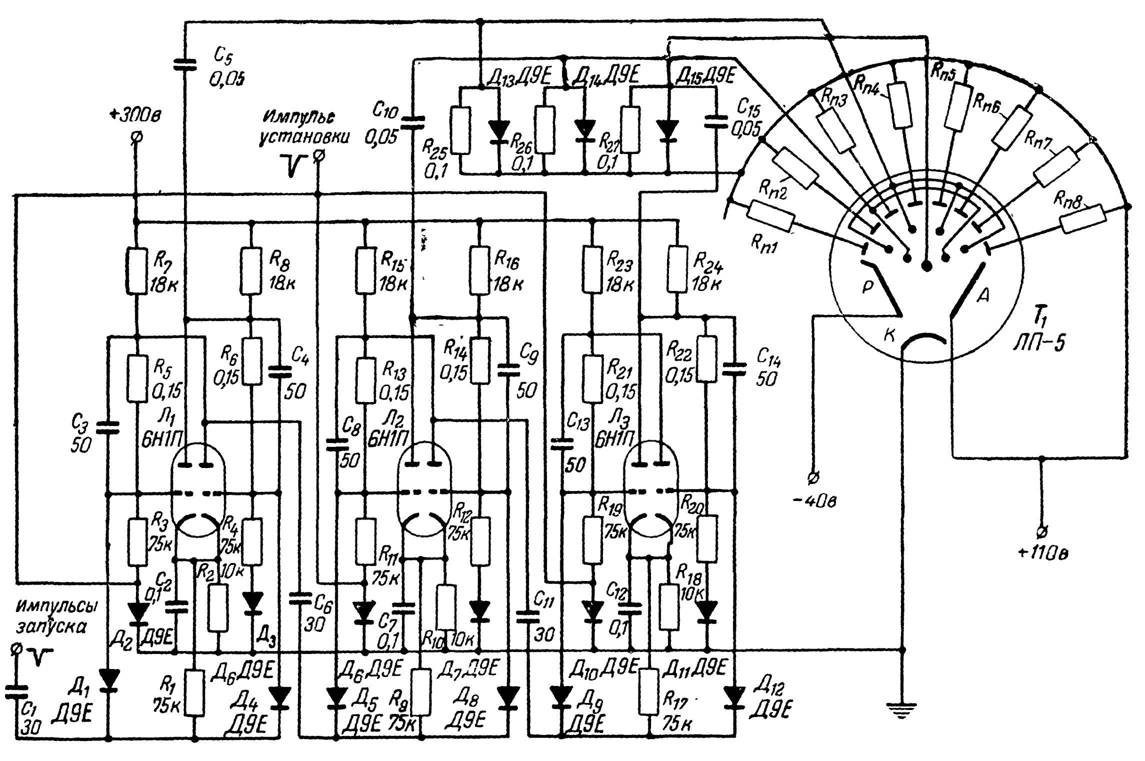


Рис. 52. Коммутатор на бинарном трохотроне.

этом на анодах правых (по схеме) триодов этих ламп потенциалы равны потенциалу источника питания. На всех трех группах лопаток потенциал равен +110 *в* и пучок в соответствии с табл. 1 находится в первой камере.

При приходе первого импульса триггер на лампе $Л_1$ опрокидывается и потенциал на группе коротких лопаток падает до —40 *в* или ниже. Это вызывает переключение пучка во вторую камеру.

При приходе второго импульса триггер на лампе $Л_1$ опрокидывается еще раз и потенциал на аноде левого триода этой лампы падает. Этот перепад подается на запуск триггера на лампе $Л_2$, который при этом опрокидывается. Таким образом, на анодах правых триодов ламп $Л_1$ и $Л_3$ потенциал будет равен потенциалу источника, а на правом триоде лампы $Л_2$ потенциал упадет. Следовательно, только на группе средних лопаток потенциал будет равен (или ниже) —40 *в*. При этом пучок перейдет во вторую камеру.

От третьего импульса опрокинется только триггер на лампе $Л_1$, потенциал на группе коротких лопаток понизится, что вызовет переход пучка в третью камеру.

Далее, при приходе очередных импульсов потенциалы на группах лопаток изменяются точно в таком же порядке, как показано в таблице.

Чтобы получить переключение пучка в обратном порядке, достаточно подключить группы лопаток не к правым триодам ламп, а к левым. Таким образом, коммутатор на бинарном трохотроне в отличие от коммутаторов на кольцевом и линейном трохотронах является реверсивным.

Применение матрицы совпадений, работающей от двух бинарных трохотронов, позволяет производить коммутацию 64 цепей. Два трохотрона матричной схемы работают от шести последовательно соединенных триггеров, причем частота обхода пучком камер первого трохотрона получается в 8 раз большей, чем частота обхода второго. Это значит, что пока пучок находится в какой-либо камере второго трохотрона, пучок в первом трохотроне пройдет все восемь положений, т. е. на всей строке матрицы последовательно появятся импульсы. В такой схеме была достигнута частота переключений порядка 200 *кгц*.

12. СХЕМЫ СОВПАДЕНИЙ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ

В технике многоканальной связи часто возникают задачи построения распределителей импульсов и схем совпадения на большое число каналов. Многие из этих задач успешно решаются в устройствах с трохотронами.

На рис. 53 показана схема совпадений по девяти параллельным входам, выполненная на линейном трохотроне. Лопатки трохотрона через сопротивления $R_л$ заземлены. Входные импульсы положительной полярности с амплитудой в несколько десятков вольт подаются на все девять лопаток. При отсутствии входных импульсов пучок поступает в десятую камеру (ближайшую к аноду). На выходе схемы (на пластине первой камеры) импульс появится только при условии, что на все девять входов одновременно поступят импульсы от цепей, в которых регистрируется совпадение каких-либо процессов. Таким образом, появление импульса тока в цепи пластины пер-

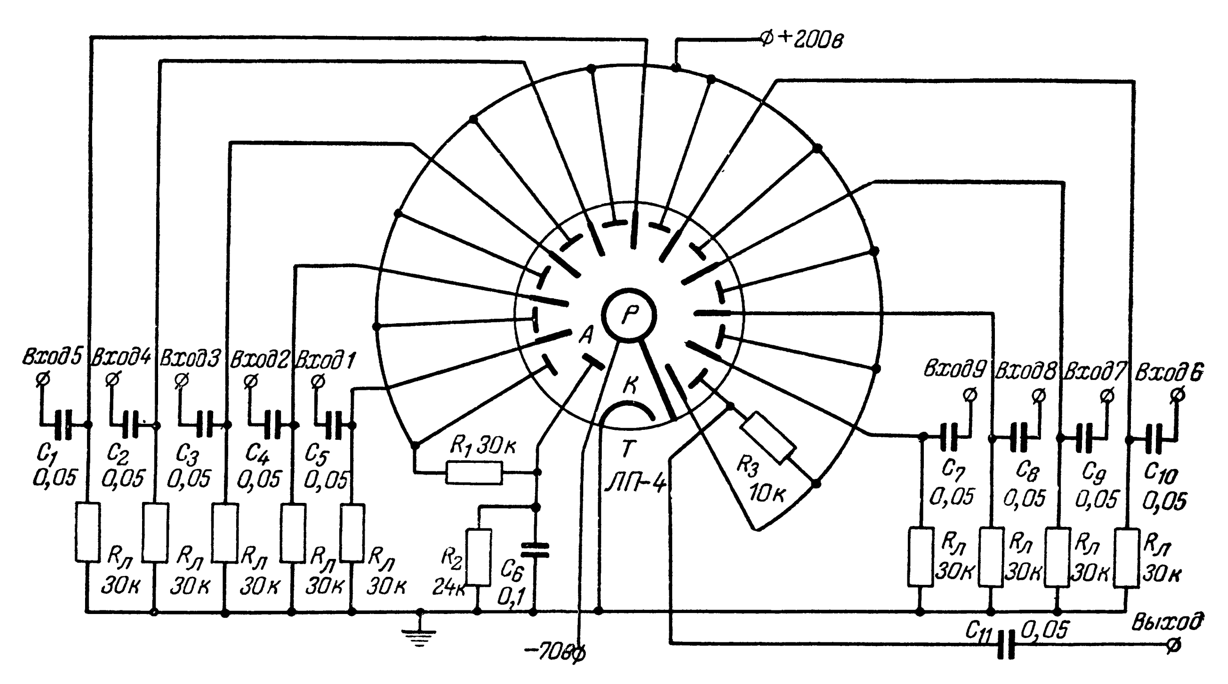


Рис. 53. Схема совпадений на линейном трохотроне.

вой камеры показывает, что в девяти входных цепях одновременно пришли импульсы.

В этой схеме управление пучком производится путем непосредственного изменения потенциала лопаток. В качестве выходной цепи используется пластина первой камеры. Все остальные пластины подключены непосредственно к источнику питания.

В некоторых импульсных устройствах требуется, чтобы ток через какую-либо нагрузку в цепях пластин шел только при условии наличия строб-импульса. При этом переключение пучка в трохотроне должно производиться нормальным образом и в отсутствие и при наличии строб-импульсов. Схема, работающая таким образом, показана на рис. 54.

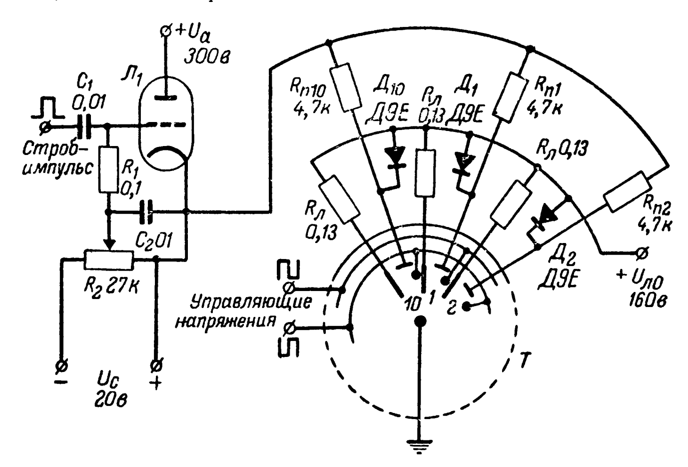


Рис. 54. Схема стробирования выходных цепей трохотрона.

Триод $Л_1$ в отсутствии строб-импульсов заперт напряжением от отдельного источника смещения $U_с$. При этом отсутствует и ток в нагрузках. Лопатки трохотрона подключены через сопротивления $R_л$ к источнику напряжения $U_{л0}$. Ток в цепях пластин идет через диоды $Д_1$ — $Д_{10}$ от источника $U_{л0}$. Пучок в трохотроне переключается обычным образом с помощью управляющих электродов последовательно из одной камеры в другую. Если во время блокировки пучка в какой-либо камере трохотрона придет строб-импульс, то вследствие того, что потенциал катода лампы $Л_1$ станет выше потенциала $U_{л0}$, через сопротивление $R_п$ в цепи пластины данной камеры будет идти ток. Чтобы каждым строб-импульсом стробировать только одну выходную цепь, следует синхронизировать подачу строб-импульсов с переключающими импульсами, причем длительность строб-импульса должна быть меньше периода переключающих импульсов.

Иногда бывает необходимо после стробирования выходных цепей запоминать положение пучка в момент стробирования до прихода следующего строб-импульса. Это — задача так называемой временной сортировки импульсов. Схема такого устройства, выпол-

ненная на двух триодах и двух трохотронах, показана на рис. 55. Левая часть ее во многом похожа на предыдущую схему. Отличием является лишь то, что в предыдущей схеме производилось импульсное стробирование тока в цепях нагрузок, а в данной схеме стробируется напряжение, снимаемое с выходных нагрузок.

При отсутствии строб-импульсов лампа $Л_1$ заперта и напряжение на сопротивлении ее нагрузки падает лишь за счет тока пластины трохотрона. Сопротивление R_1 выбирается таким, чтобы потенциал анода был выше потенциала U_0 цепи питания пластины. Тогда диоды $Д_2$ будут заперты при любом положении пучка в трохотроне; тем самым обеспечивается отключение всех нагрузок $R_п$ от пластин. Когда приходит строб-импульс, потенциал анода лампы $Л_1$ понижается ниже величины U_0, диоды $Д_1$ запираются, а ток пластины той камеры, в которой в это время находится пучок трохотрона, протекает через соответствующие диод $Д_2$ и сопротивление $R_п$. На этом сопротивлении выделяется отрицательный видеоимпульс. Переключение пучка в трохотроне T_1 производится с помощью двух групп управляющих электродов, на которые подается двухтактное импульсное напряжение с формирователя.

Все десять нагрузочных сопротивлений $R_п$ трохотрона T_1 через разделительные конденсаторы соединены с соответствующими десятью цепями лопаток трохотрона T_2, на котором построена схема памяти. Управляющие электроды трохотрона T_2 соединены все вместе и подключены к источнику постоянного напряжения, равного примерно $U_{л0}/2$. Все десять лопаток трохотрона T_2 подсоединяются через сопротивления $R_{л1}$ и $R_{л2}$ к общему нагрузочному сопротивлению R_2, к которому подключен также анод лампы $Л_2$.

Лампа $Л_2$ заперта по сетке отрицательным смещением. На сетку этой лампы подается продифференцированный строб-импульс. Короткий положительный импульс, соответствующий переднему фронту строб-импульса, откроет лампу $Л_2$, что вызовет падение напряжения на сопротивлении R_2 ниже потенциала сброса. Следовательно, в самом начале строб-импульса трохотрон T_2 переходит в состояние отсечки. Во время действия этого строб-импульса появляется отрицательный импульс на каком-либо сопротивлении $R_п$, длительность которого равна длительности строб-импульса. Этот импульс передается на сопротивление $R_{л2}$ в цепи соответствующей лопатки трохотрона T_2. Пучок в трохотроне T_2 блокируется в такой же по порядковому номеру камере, в какой находился пучок трохотрона T_1 в момент действия строб-импульса.

При приходе следующего строб-импульса пучок в трохотроне T_2 сначала переходит в состояние отсечки, а затем блокируется в определенной камере, на лопатку которой будет подан отрицательный импульс с трохотрона T_1 .Таким образом, пучок в трохотроне T_2 запоминает положение пучка в трохотроне T_1 в моменг действия строб-импульса.

В многоканальной технике часто используются схемы смешения, с помощью которых импульсы разных каналов собираются в один канал. На рис. 56,*а* представлена схема с десятью входами и одним общим выходом. Положительные импульсы, действующие на входах схемы, проходят на выход только в те моменты, когда пучок находится в соответствующих камерах трохотрона. Если импульсы на всех входах отсутствуют, то из-за того что потенциал пластин практически не может понизиться ниже потенциала заземленной

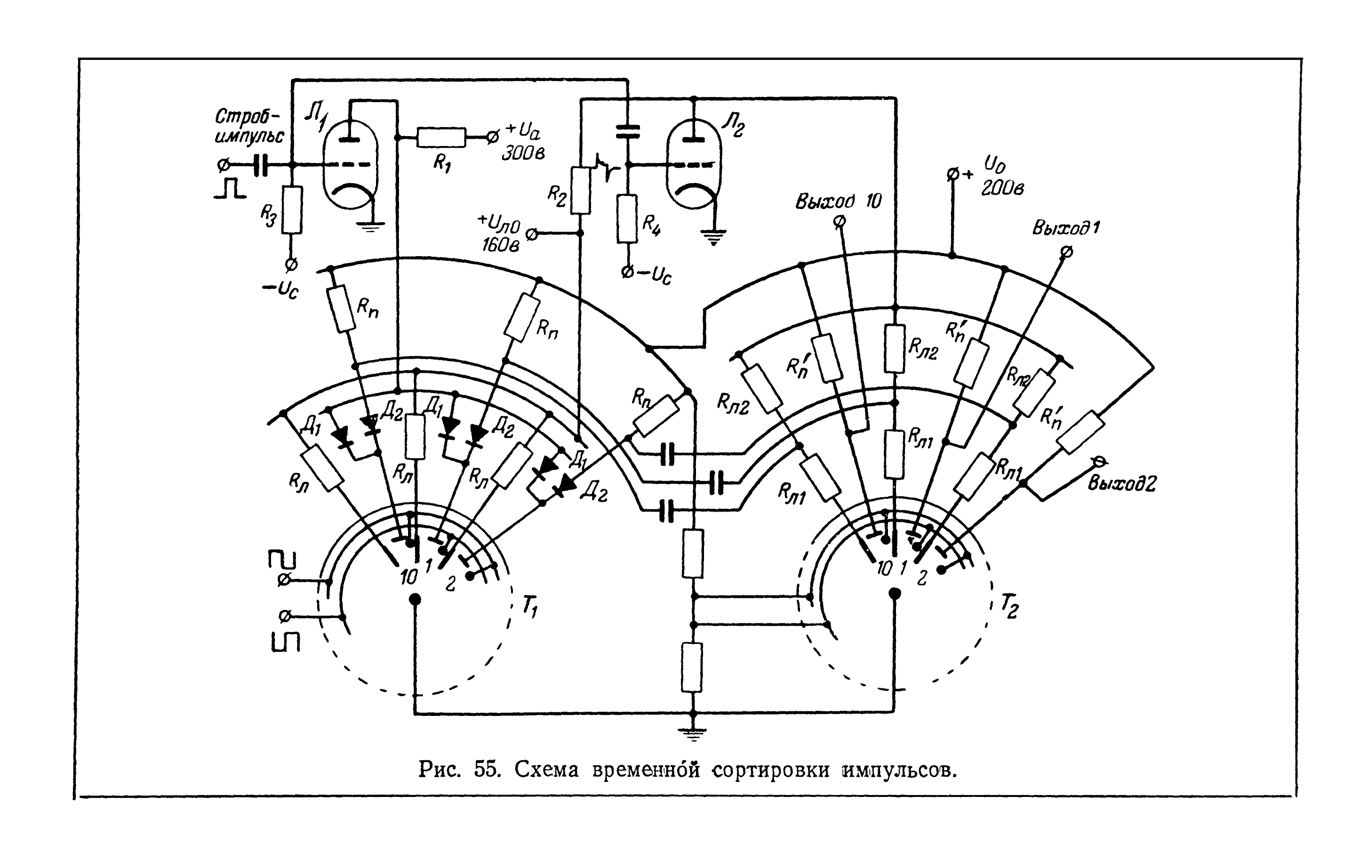


Рис. 55. Схема временной сортировки импульсов.

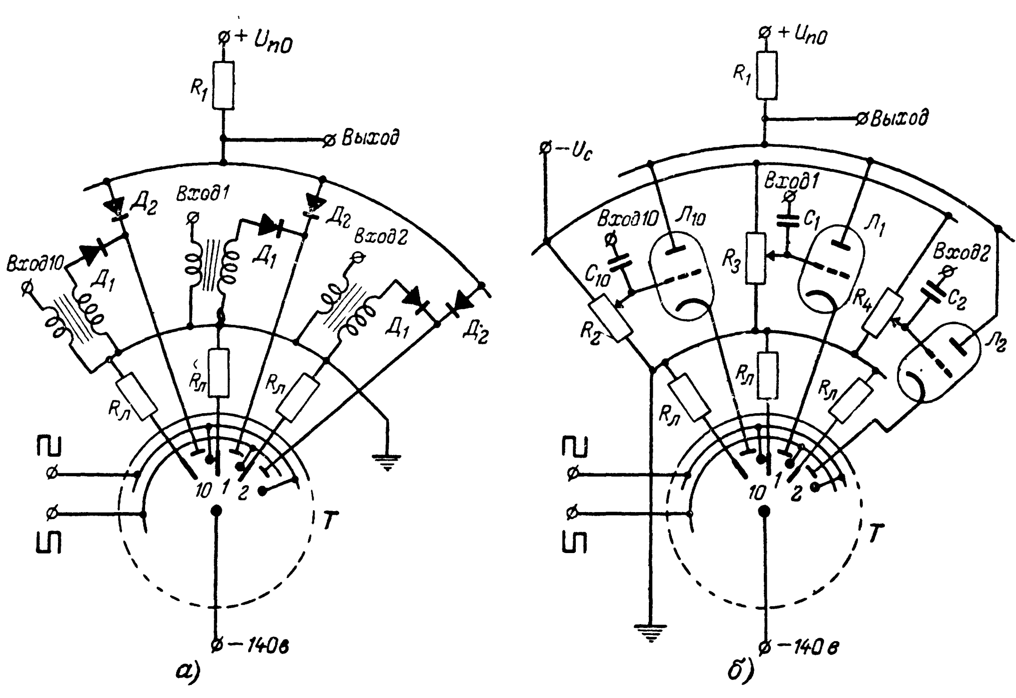


Рис. 56. Схемы многоканального преобразования.

а — с использованием полупроводниковых диодов; *б* — с использованием ламп.

шины, благодаря подключению пластин к этой шине через диоды $Д_1$ и вторичные обмотки входных трансформаторов, напряжение на сопротивлении R_1 при переключении пучка в трохотроне будет примерно равно нулю. Если на какой-то вторичной обмотке будет действовать положительный видеоимпульс, а пучок в это время не находится в соответствующей камере, то этот импульс не пройдет на нагрузку R_1 из-за обратного включения диода $Д_2$, анод которого находится под нулевым потенциалом за счет прохождения через сопротивление R_1 тока какой-то другой пластины. Лишь в том случае, если на данной вторичной обмотке действует положительный импульс и пучок находится в это время в соответствующей камере, потенциал нижней точки сопротивления R_1 поднимается до величины, равной амплитуде действующего на обмотке импульса. Таким образом, импульс с данной обмотки пройдет на общую нагрузку R_1.

Чтобы эта схема работала правильно, сопротивление R_1 следует выбирать такой величины, чтобы падение напряжения на нем за счет тока пучка трохотрона было несколько больше напряжения источника питания пластин $U_{п0}$, т. е. чтобы при отсоединенных диодах $Д_1$ потенциал любой пластины при прохождении в ее цепи тока падал несколько ниже нулевого значения.

На рис. 56,*б* показана аналогичная схема, выполненная на одном трохотроне и десяти триодах. Если триоды подобраны с одинаковыми параметрами, то при их последовательном открывании за счет понижения потенциала катода напряжение на общей нагрузке изменяться не будет, так как все токи триодов при отсутствии входных сигналов будут одинаковыми. Если на сетку какого-то триода при наличии тока пучка в соответствующей пластине трохотрона подать положительный импульс, то этот триод будет работать при другом сеточном напряжении и с общей нагрузки будет сниматься отрицательный импульс.

В качестве распределителей импульсов из одной цепи по многим каналам находят широкое применение пирамидальные селекторы, которые удобно строить на бинарных трохотронах. На рис. 57 показана схема пирамидального селектора на 64 выходных канала, выполненного на девяти трохотронах. Чтобы не загромождать схему, показаны только три трохотрона. Остальные шесть включены так же, как второй и третий. Переключающие сигналы двух уровней +110 и —40 *в* подаются на селектор по шести линиям. В зависимости от сочетания этих сигналов в соответствии с таблицей 1 пучок в трохотронах может находиться в любой, вполне определенной камере.

В нормальном состоянии трохотроны заперты по анодам. При приходе положительного импульса на анод первого трохотрона пучок попадает на определенную пластину трохотрона T_1 (в зависимости от сочетания переключающих сигналов на линиях *1—3*). С этой пластины отрицательный импульс подается на соответствующий триод, с помощью которого производятся усиление импульса и изменение его полярности на положительную. Далее этот импульс поступает на анод соответствующего трохотрона. В зависимости от сочетания переключающих сигналов на линиях *4—6* пучок в этом трохотроне попадает на определенную пластину.

Таким образом, подав определенное сочетание постоянных переключающих напряжений двух уровней на шесть линий, можно входной импульс передать на любой из 64 выходов.

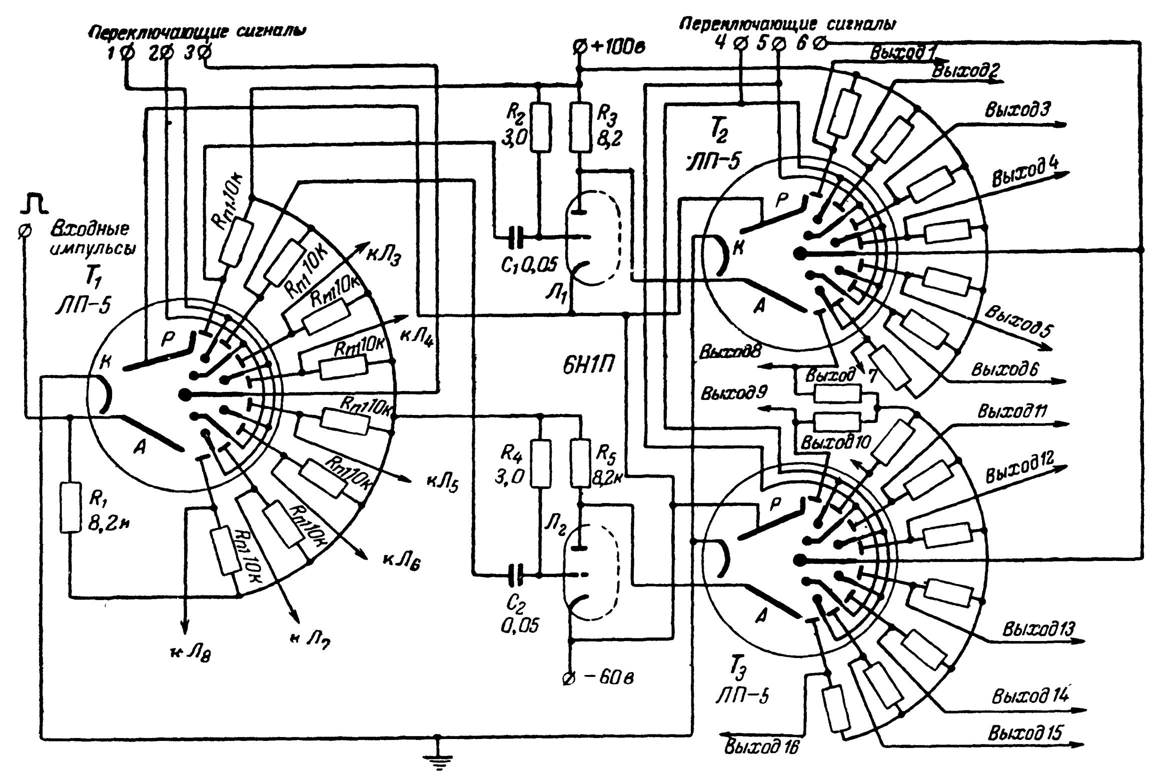


Рис. 57. Схема пирамидального селектора на бинарных трохотронах с 64 выходными каналами.

13. СУММАТОРЫ И ДЕШИФРАТОРЫ НА БИНАРНЫХ ТРОХОТРОНАХ

На бинарном трохотроне может быть легко выполнен сумматор двоичных чисел. Каждое число может иметь n-разрядный двоичный последовательный код. А подаваться на сумматор два числа должны параллельно, т. е. одновременно.

На рис. 58,*а* представлена схема сумматора, а на рис. 58,*б* — эпюры напряжений в различных точках схемы. Группа коротких лопаток является одним входом схемы, а группа средних лопаток — другим входом. Длинная лопатка используется для подачи положительных импульсов переноса в другой разряд. Импульсы переноса в другой разряд образуются с помощью линии задержки и инвертора полярности задержанного импульса. Время задержки выбирается равным тактовому времени импульсов двоичного кода.

Выход схемы подключен непосредственно к пластинам *1*, *6* и *7* и через буферный катодный повторитель к пластине *4*. Вход линии задержки подключен к пластинам *2*, *3* и *8* и также через катодный повторитель к пластине *4*. Таким образом, импульсы на выходе сумматора образуются всякий раз, когда пучок попадает в камеру *1*, *4*, *6* или *7*, а импульсы переноса образуются при попадании в камеру *2*, *3*, *4* или *8*.

На входы *I* и *II* схемы сумматора поступают два двоичных числа в виде двух двоичных кодовых групп. Импульсы кодовых групп имеют отрицательную полярность и по амплитуде равны около 150 *в*. Амплитуду импульсов можно уменьшить, изменив режим трохотрона. При отсутствии импульсов на обоих входах сумматора пучок в трохотроне попадает (в соответствии с таблицей) в камеру *5*. Пластина этой камеры непосредственно подсоединена к источнику питания и, таким образом, в работе сумматора не участвует.

При подаче на входы двух шестиразрядных кодовых групп, показанных на эпюрах *1* и *2* (рис. 52,*б*), суммирование их производится следующим образом. В первый тактовый период отрицательный импульс присутствует только на первом входе и пучок в трохотроне попадает в шестую камеру. Так как пластина *6* непосредственно связана с выходом, то на нем в первый тактовый период образуется отрицательный импульс (эпюра *5*). Внизу под эпюрами показано положение пучка в трохотроне в различные тактовые периоды. Во второй тактовый период отрицательный импульс поступает только на второй вход схемы и пучок в трохотроне проходит в седьмую камеру. Пластина этой камеры также непосредственно связана с выходом, поэтому и во второй тактовый период на выходе образуется отрицательный импульс.

В третий тактовый период отрицательные импульсы поступают сразу на два входа и пучок в трохотроне попадает в восьмую камеру. Импульс с пластины *8* на выход не проходит, а поступает на вход линии задержки (эпюра *3*), задерживается ею на время тактового периода и после инвертора в виде импульса переноса положительной полярности поступает на длинную лопатку трохотрона (см. эпюру *4*). Этот импульс имеет место уже в четвертом тактовом периоде, когда на первый вход поступает новый отрицательный импульс. Если бы ни на одном из входов в четвертом тактовом периоде не было импульсов, то импульс переноса заставил бы пучок отклониться в первую камеру и на выходе сумматора образовался бы

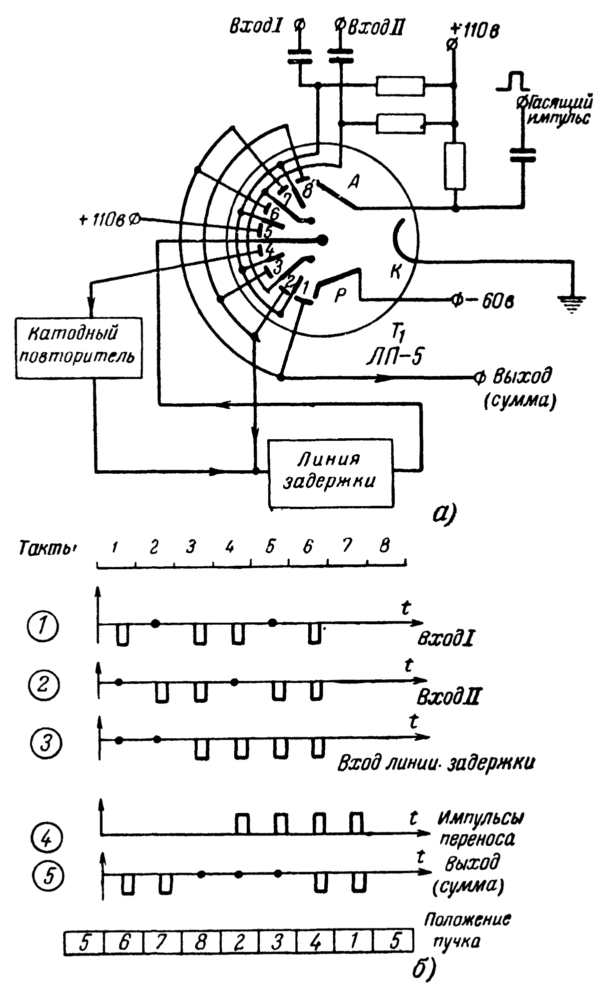


Рис. 58. Схема сумматора двоичных чисел на бинарном трохотроне (*а*) и эпюры напряжений в различных точках схемы (*б*).

в четвертом периоде отрицательный импульс. В данном же случае во время действия импульса переноса на один из входов, а именно на вход *I*, пришел новый импульс. Одновременное наличие положительного импульса на длинной лопатке и отрицательного на коротких приводит к попаданию пучка трохотрона во вторую камеру.

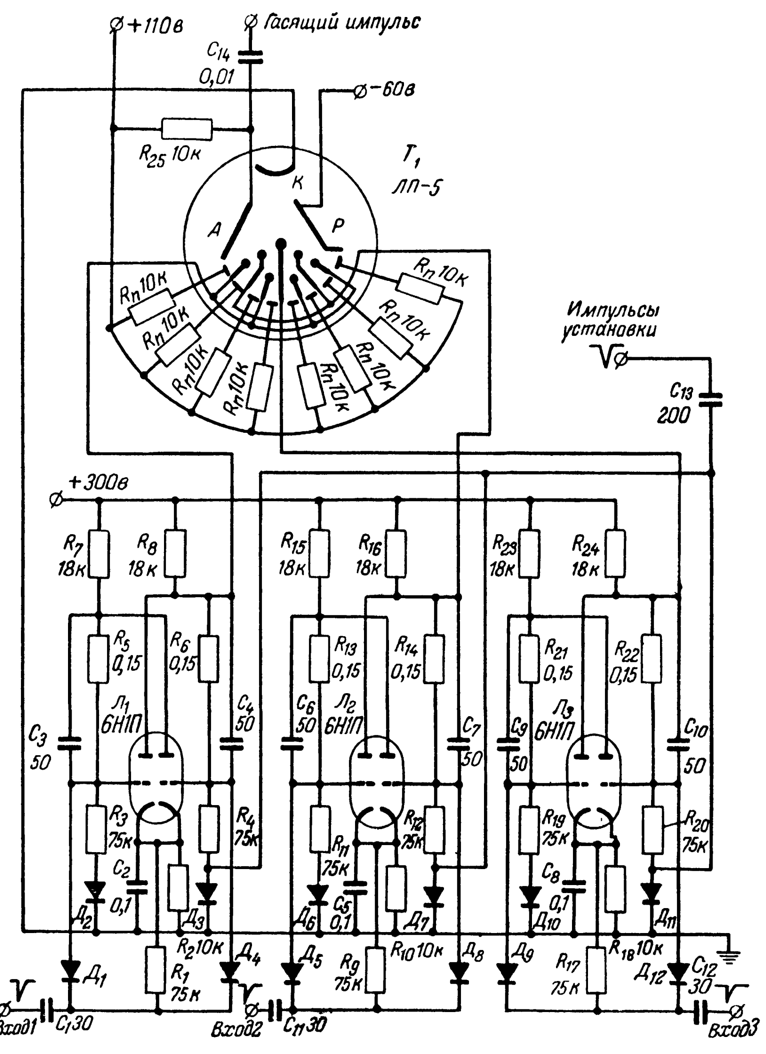


Рис. 59. Схема дешифратора трехразрядного параллельного двоичного кода.

С выхода пластины *2* импульс снова попадает не на выход сумматора, а на линию задержки. Следовательно, в пятый тактовый период на длинной лопатке будет присутствовать положительный импульс переноса. Одновременно с ним в этот же тактовый период на вход *II* сумматора поступает отрицательный импульс. Такое положение приводит к тому, что пучок попадает в третью камеру трохотрона. С пластины *3* отрицательный импульс также поступает на линию задержки и не проходит на выход сумматора.

В шестой тактовый период на длинной лопатке действует положительный импульс переноса, а на средних и коротких лопатках— отрицательные импульсы, которые поступили сразу на два входа. При такой комбинации импульсов на лопатках трохотрона пучок попадает в четвертую камеру. Отрицательный импульс с пластины *4* подается на вход буферного катодного повторителя, с выхода которого импульсы поступают как на выход сумматора, так и на линию задержки для образования импульса переноса в седьмом тактовом периоде.

Так как на входы сумматора подаются шестиразрядные кодовые группы и в седьмом тактовом периоде импульсы отсутствуют, пучок в трохотроне в седьмом тактовом периоде попадет на пластину *1*. Импульс с пластины *1* поступает непосредственно на выход сумматора.

Таким образом, в данном примере при суммировании двух шестиразрядных двоичных чисел образовалось суммарное семиразрядное число. Входные числа при этом были взяты такими, что пучок побывал за цикл сложения во всех восьми камерах трохотрона.

Для приведенной схемы минимальный тактовый период составлял 2—3 *мксек*. Пучок в трохотроне гасится с помощью дополнительных импульсов с тем, чтобы во время переходных процессов не иметь на выходах трохотрона ложных импульсов.

На рис. 59 приведена схема дешифратора трехразрядного параллельного двоичного кода. Три группы лопаток трохотрона подключены непосредственно к выходам трех триггеров. Половина триггеров, которые подключены к трохотрону, в нормальном состоянии заперта, и на всех трех группах лопаток имеется положительное относительно катода трохотрона напряжение 110 *в*. Это означает, что пучок в трохотроне при кодовой группе 000 (импульсов на входе дешифратора нет) находится в первой камере. При подаче импульса только на первый триггер, т. е. при кодовой группе 100, понижается потенциал на группе коротких лопаток и пучок переходит во вторую камеру. После действия каждой кодовой группы схема возвращается в исходное состояние с помощью импульсов установки. Таким образом, при различных восьми сочетаниях импульсов в трехразрядной кодовой группе пучок попадает в различные камеры трохотрона.

14. ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЕЛЕНИЯ

Диапазонный делитель частоты с управляемым коэффициентом деления представляет собой устройство, частота на выходе которого в целое число раз меньше, чем частота входного напряжения, при изменении последней в широком диапазоне. Такие делители находят применение в качестве датчиков импульсов, следующих через произ-

вольные заданные промежутки времени, кратные периоду задающего генератора, в качестве индикаторов, вырабатывающих на выходе импульсный сигнал после поступления на вход любого, заранее заданного количества импульсов, и в качестве формирователя серий импульсов с произвольным числом импульсов в серии и произвольными интервалами между сериями, кратными периоду входного напряжения.

Делители на трохотронах позволяют делить частоту в диапазоне от самых низких частот до 5 *Мгц* и даже выше. Простейшим способом изменения коэффициента деления является объединение (замыкание накоротко) нескольких лопаток и объединение нескольких пластин.

При соединении лопаток девятой камеры с лопаткой первой камеры пучок после переключения из восьмой камеры попадает сразу в первую, т. е. при съеме выходных импульсов с одной какой-либо пластины коэффициент деления будет равен 8. Аналогичным образом можно осуществить деление на 6. Четный коэффициент деления будет всегда получаться при подаче на управляющие электроды двухтактного импульсного напряжения. Если же переключение пучка в трохотроне производится с помощью одиночных управляющих импульсов, то описанным выше образом можно устанавливать коэффициент деления равным 6, 7, 8, 9 или 10. Коэффициент деления меньше 6 путем замыкания накоротко лопаток получить не удается в связи с особенностями формирования пучка в трохотроне.

Способ объединения пластин заключается в том, что переключение пучка в трохотроне остается неизменным: пучок последовательно обходит все десять камер, но съем выходных импульсов производится либо с одной какой-то пластины (в этом случае коэффициент деления равен 10), либо со всех нечетных (или четных) пластин, соединенных вместе (в этом случае коэффициент деления равен 2), либо с двух противоположных пластин, например первой и шестой (в этом случае коэффициент деления равен 5).

Схема, позволяющая изменять коэффициент деления трохотрона от 2 до 10, показана на рис. 60. На ней функционально показаны два блокинг-генератора, работающих в ждущем режиме. Вход блокинг-генератора $Г_1$ подключен через переключатель *П* к одной из пластин *3, 5, 7* или *9* камер трохотрона. При попадании пучка в камеру, к которой подключен вход блокинг-генератора, на выходе его вырабатывается положительный импульс сброса, подаваемый на катод трохотрона. Импульс сброса должен иметь амплитуду порядка 120 *в* и длительность в несколько микросекунд. При воздействии импульса сброса пучок в трохотроне выключается. Этот же импульс с блокинг-генератора $Г_1$ через линию задержки *ЛЗ* со временем задержки, равным примерно длительности импульса сброса, поступает на запуск другого блокинг-генератора $Г_2$, который вырабатывает отрицательные импульсы установки пучка в первую камеру. Импульс установки должен иметь амплитуду порядка 150 *в* и длительность не менее 0,1 *мксек*. В результате процесс перевода пучка из какой-либо камеры в первую занимает время 0,5—1 *мксек*. Это ограничивает верхний предел делимых частот до 1—2 *Мгц*.

На высоких частотах лучшие результаты дает схема, показанная на рис. 61. В этой схеме используются два трохотрона, у которых выходы соответствующих пластин соединены параллельно через диоды *Д*. Вход блокинг-генератора $Г_1$ подключен так же, как

и в предыдущей схеме, через переключатель *П* к одной из четырех выходных точек схемы. Трохотроны работают последовательно: когда один трохотрон выключен, другой включен и наоборот. Это попеременное включение и выключение трохотронов производится с помощью двух блокинг-генераторов $Г_2$ и $Г_3$. Каждый из этих блокинг-генераторов, запускаясь от импульса, снимаемого с общей нагрузки цепей пластин R_I или R_{II}, вырабатывает положительный импульс сброса.

Работа схемы происходит следующим образом. В начальном состоянии (когда на формирователь еще не подается входное напряжение для деления) пучок в трохотроне T_1 устанавливается в пер-

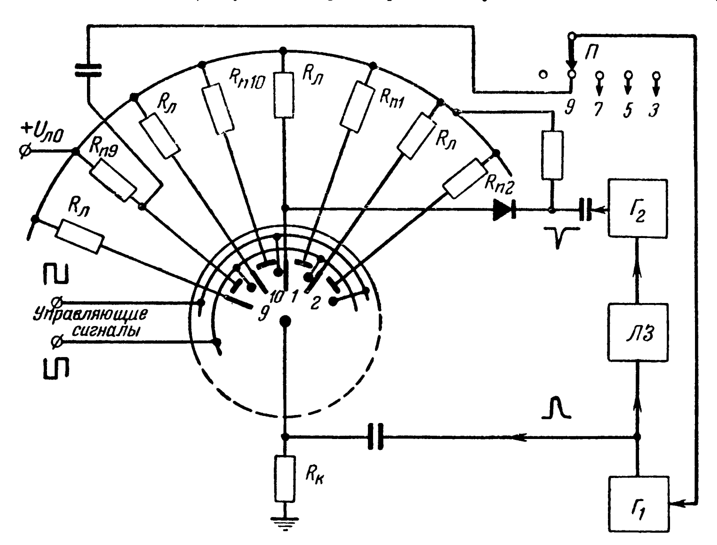


Рис. 60. Схема диапазонного делителя частоты на одном трохотроне.

вую камеру с помощью кнопки *Кн*; пучок в трохотроне T_2 выключен. При подаче входного сигнала пучок в трохотроне T_1 переключается из камеры в камеру. При появлении пучка в камере, пластина которой через диод *Д* и переключатель подсоединена к входу блокинг-генератора $Г_1$, вырабатывается отрицательный импульс установки, подаваемый сразу на обе лопатки первых двух камер двух трохотронов. Так как пучок в трохотроне T_2 был выключен, то при подаче импульса установки он попадает в первую камеру. Ток пластины первой камеры проходит через сопротивление R_{II}. Импульс с этого сопротивления поступает на запуск блокинг-генератора $Г_3$, который запускается только отрицательными импульсами. Этот блокинг-генератор вырабатывает положительные импульсы сброса, подаваемые в катод трохотрона T_1 для перевода его в состояние отсечки. Блокинг-генератор $Г_2$ при этом не запускается, так как он не реагирует на положительные импульсы, а в данный момент на

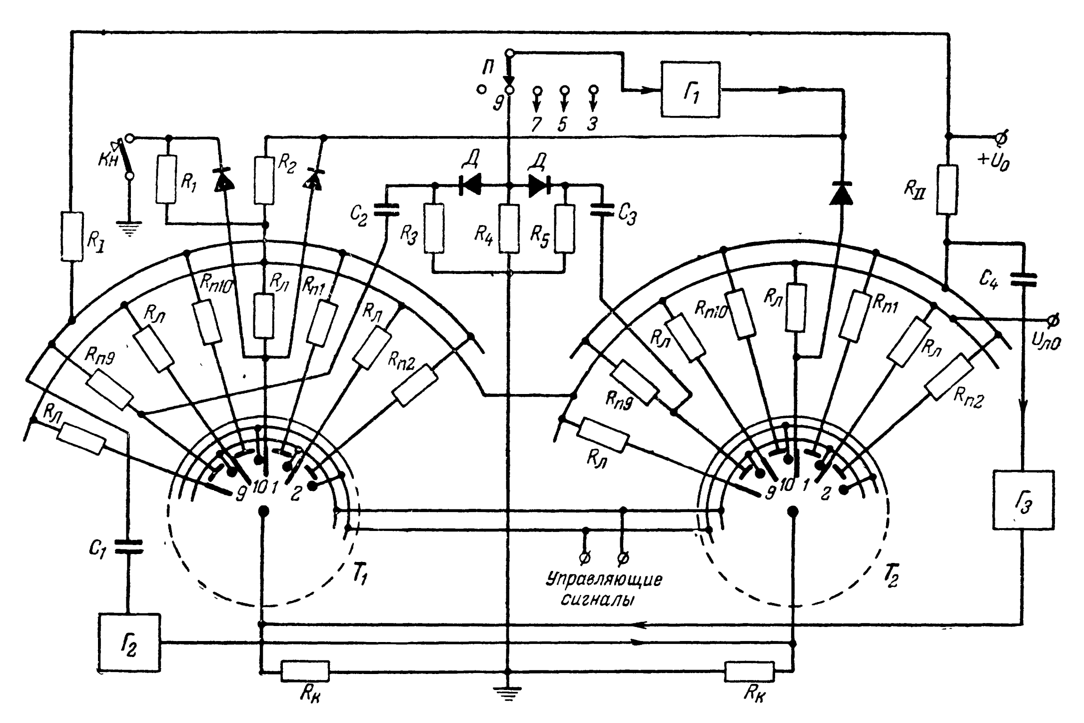


Рис. 61. Схема диапазонного делителя частоты на двух трохотронах.

сопротивлении R_I будет именно положительный перепад напряжения (ток пластин стал равен нулю).

На быстродействие всей схемы влияет лишь время, необходимое для установки пучка в трохотроне T_2 в первую камеру. Это время можно довести до 0,1 *мксек.*

В дальнейшие периоды входного сигнала пучок последовательно переключается в трохотроне T_2, пока не достигнет соответствующей пластины, соединенной с входом блокинг-генератора $Г_1$. Далее происходит процесс включения пучка в первую камеру трохотрона T_1 и выключения пучка в трохотроне T_2.

Так как трохотроны работают последовательно, то время, в течение которого должны восстановиться паразитные емкости лопаток, удваивается. Кроме того, в данной схеме не требуется задержки между импульсами сброса и установки, так как они воздействуют одновременно на разные трохотроны.

Пластины первого и второго трохотронов соединены параллельно через диоды для того, чтобы при включении пучка в первом трохотроне не возникал отрицательный импульс на общей нагрузке R_{II} второго трохотрона и наоборот.

В обеих приведенных выше схемах импульсы на запуск блокинг-генератора снимались лишь с нечетных выходов (*3*, *5*, *7*, *9*), при этом коэффициент деления соответственно был равен 2, 4, 6 и 8. Чтобы получить коэффициент деления, равный *10*, переключатель переводится в левое (по схеме) положение (блокинг-генераторы при этом не работают). При применении в схеме формирователей одиночных переключающих импульсов может быть построена схема с управляемым коэффициентом деления от 2 до 10 подряд. Для этого необходим переключатель *П* на десять положений.

При применении n последовательно соединенных трохотронов (способом, аналогичным соединению декад в пересчетном устройстве) максимальный коэффициент деления можно увеличить. Если производить съем выходных импульсов с любого выхода каждого трохотрона через переключатели на схему совпадений, то, выбирая положения переключателей, можно получить на выходе схемы совпадений импульс, соответствующий приходу определенного количества импульсов на вход схемы делителя. Со схемы совпадений импульс подается на блокинг-генератор, который вырабатывает импульс сброса на все трохотроны. Этот же импульс через небольшую линию задержки запускает еще один блокинг-генератор, вырабатывающий отрицательный импульс установки всех трохотронов в исходное положение. Сброс и установка, как уже отмечалось выше, производятся за время, примерно равное 0,5 *мксек*. Следовательно, в такой схеме на n трохотронах можно получить коэффициент деления, изменяемый в широких пределах с помощью декадных переключателей при максимальной частоте входного сигнала в несколько мегагерц. Основное влияние на быстродействие схемы оказывает работа первой декады.

Диапазонные делители частоты могут применяться не только для получения сетки частот, каждая из которых в n раз меньше, чем частота задающего генератора, но и для получения сетки таких частот, которые могут быть выше частоты задающего генератора.

В качестве примера на рис. 62 приведена описанная в зарубежной литературе блок-схема получения сетки стабильных частот в диапазоне 2—30 *Мгц* с интервалами через 1 *кгц*, причем частоты

сетки имеют стабильность порядка 10^{-7}. В блок-схеме применяется *LC* генератор, который стабилизируется с помощью делителя с переменным коэффициентом деления от задающего кварцевого генератора.

Схема работает следующим образом. Задающий кварцевый генератор генерирует напряжение частотой 5 *Мгц*. Эта частота делится с помощью схемы регенеративного делителя в 5 раз. Далее, частота 1 *Мгц* делится трехдекадным делителем еще на 1 000. На выходе этого делителя получается напряжение стабильной частоты 1 *кгц*.

Напряжение частотой 1 *Мгц* подается, кроме того, на синхронизацию *LC* генератора, вырабатывающего стабильные частоты от 3 до 31 *Мгц* через интервал 1 *Мгц*. Частота, генерируемая этим гене-

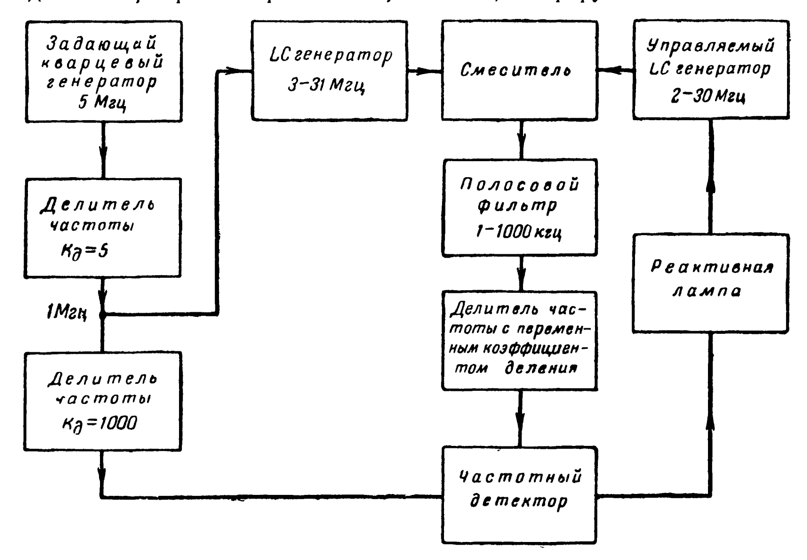


Рис. 62. Блок-схема использования диапазонного делителя частоты для получения сетки стабильных частот.

ратором, устанавливается с помощью двух переключателей, один из которых на четыре положения, а другой на десять положений.

Эти же переключатели включают соответствующий диапазон управляемого *LC* генератора, который перекрывает частоты от 2 до 30 *Мгц*. Интервал этот разбит на диапазоны по 1 *Мгц*. В пределах любого выбранного диапазона частоту можно менять плавно.

Частоты с генераторов подаются на смеситель и далее на фильтр. На выходе фильтра выделяется разностная частота, которая всегда меньше 1 *Мгц*. Далее сигнал этой частоты подается на диапазонный делитель с переменным коэффициентом деления. В зависимости от требуемой разницы между частотами двух *LC* генераторов коэффициент деления делителя выбирается в пределах от 1 до 1 000 с тем, чтобы на выходе иметь частоту 1 *кгц*. Эта частота и

опорная стабильная частота 1 *кгц* от делителя с фиксированным коэффициентом деления, равным 1 000, подаются на частотный детектор, вырабатывающий сигнал ошибки для петли автоподстройки управляемого *LC* генератора. Сигнал ошибки в виде постоянного напряжения подается на реактивную лампу, а та изменяет частоту управляемого генератора так, чтобы иметь на выходе диапазонного делителя частоты сигнал с частотой 1 *кгц*. Коэффициент деления диапазонного делителя частоты устанавливается с помощью трех переключателей, каждый из которых связан с соответствующей декадой делителя.

Таким образом, всего имеется пять переключателей, с помощью которых можно набрать значение любой частоты в диапазоне от 2 до 30 *Мгц* через интервал 1 *кгц*. Стабильность частоты определяется стабильностью задающего кварцевого генератора, генерирующего фиксированную частоту 5 *Мгц*.

Другая схема стабильного генератора сетки частот (рис. 63) использует пересчетное устройство с предварительной установкой числа импульсов. Последнее является звеном системы автоматической подстройки частоты, основанной на сравнении двух интервалов времени, один из которых (образцовый) формируется от задающего кварцевого генератора фиксированной частоты. Такой генератор сетки частот обеспечивает высокую стабильность работы и повторяемость установки частоты в широком диапазоне через небольшие интервалы. Верхняя граница диапазона генератора определяется быстродействием первой декады пересчетного устройства.

Сигнал от кварцевого генератора подается на формирователь образцовых импульсов. На выходе формирователя имеет место последовательность прямоугольных импульсов образцовой длительности T_0, показанных на эпюре *А*.

Сигналы с управляемого генератора, частота которого в некоторых пределах может управляться постоянным напряжением, подаются через формирователь и ключ на вход пересчетного устройства с предварительной установкой числа импульсов. Пересчетное устройство состоит из n декад. Предварительная установка числа импульсов производится переключателями $П_1$—$П_n$. Использование кольцевых трохотронов в декадах облегчает задачу предварительной установки любого числа импульсов, так как для этого требуются менее сложные коммутационные схемы. Все десять пластин каждого трохотрона подключаются к контактам соответствующего переключателя. С переключателей импульсные сигналы подаются на схему совпадения с n входами. Появление импульса на выходе совпадения означает конец данного измеряемого интервала $T_{изм}$.

Начало измеряемых интервалов совпадает, как это видно из эпюр *Б* и *В*, с началом образцовых интервалов. Временна́я привязка начала интервалов осуществляется через схему формирования импульсов начала интервалов. Эти импульсы показаны на эпюре *Б*.

Сигналы измеряемых интервалов подаются на схему сравнения, на выходе которой вырабатываются импульсы рассогласования (эпюра *Г*), имеющие постоянную амплитуду. Полярность этих импульсов зависит от знака рассогласования: если $T_{изм} > T_0$, то импульсы рассогласования положительны, если же $T_{изм} < T_0$, то импульсы рассогласования отрицательны. Длительность импульсов рассогласования равна абсолютной величине разности интервалов $|T_{изм} - T_0|$.

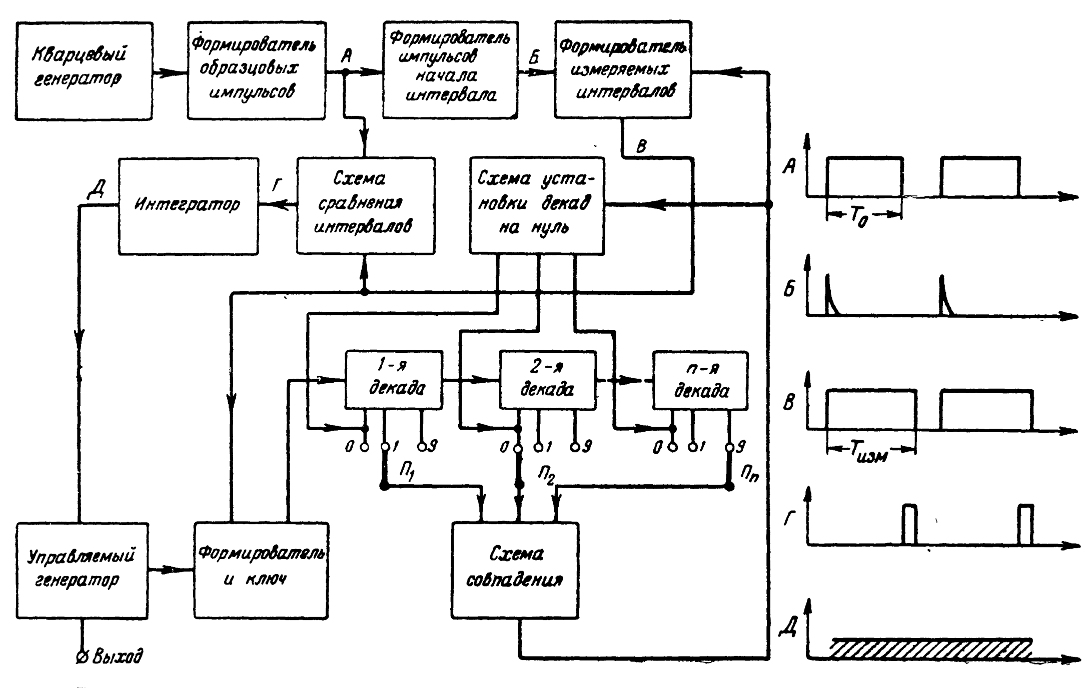


Рис. 63. Блок-схема диапазонного стабильного генератора с дискретной установкой частоты и эпюры сигналов в различных точках схемы.

Импульсы рассогласования подаются на интегратор, на выходе которого вырабатывается постоянное напряжение (эпюра *Д*), пропорциональное их длительности. Полярность постоянного напряжения соответствует полярности импульсов рассогласования. Постоянное напряжение на выходе интегратора является управляющим для управляемого генератора. Под его воздействием частота генератора изменяется так, что разность $|T_{изм}-T_0|$ стремится к нулю.

Схема установки на нуль служит для включения электронных пучков во всех трохотронах в нулевые камеры после каждого измерения интервала $T_{изм}$. В этом состоянии трохотроны находятся до начала следующего интервала. На это же время ключевая схема отключает вход пересчетного устройства от генератора.

Следует подчеркнуть, что для уменьшения ошибки автоподстройки и упрощения схемы управляемого генератора частота последнего переключается (грубо) с помощью декадных переключателей старших разрядов $П_n$ и $П_{n-1}$ всякий раз, когда изменяются эти разряды предварительно устанавливаемого в пересчетном устройстве числа импульсов. В этом случае диапазон автоподстройки сокращается на два порядка, что повышает точность автоподстройки.

Применение кольцевых трохотронов в пересчетном устройстве с предварительной установкой числа импульсов имеет и то преимущество, что при этом уменьшается погрешность измерений интервала $T_{изм}$. В таких же устройствах с декатронами неизбежна значительная величина погрешности, обусловленная запаздыванием импульса на выходе каждого декатрона по отношению к последнему подсчитываемому импульсу. Эта погрешность для одной декады доходит до 200—400 *мксек*, а для большего количества декад соответственно увеличивается. Так, например, при применении пяти декад и в самом неблагоприятном случае, когда предварительно установленное число импульсов составляет 10^5 (при этом при приходе последнего подсчитываемого импульса газовый разряд в каждом декатроне переходит с девятого штырька на нулевой), общее запаздывание достигает 2 *мсек*. При применении же кольцевых трохотронов общее запаздывание для пяти декад будет составлять примерно 1 *мксек*, причем эта погрешность не изменяется от величины предварительно устанавливаемого числа (при неизменной разрядности этого числа), так как кольцевой трохотрон представляет собой симметричную конструкцию, и разрешающее время вследствие этого неизменно для всех камер трохотрона. Погрешность будет изменяться лишь от изменения количества разрядов предварительно устанавливаемого числа.

Описанный в зарубежной литературе генератор такого типа имеет следующие параметры: диапазон управляемого генератора от 100 *кгц* до 1 *Мгц*, диапазон автоподстройки 10 *кгц* при максимальной величине управляющего сигнала 20 *в*, величина образцового интервала $T_0=1$ *сек*, пауза между образцовыми интервалами 0,11 *сек*, стабильность генератора 0,01%.

15. СХЕМЫ НА ЛИНЕЙНЫХ ТРОХОТРОНАХ

Здесь описываются схемы, использующие специфические свойства линейных трохотронов.

Как известно, пучок в линейном трохотроне, двигаясь по эквипотенциали электрического поля, соответствующей потенциалу като-

да, попадает в камеру, лопатка которой имеет ближайший к потенциалу катода больший потенциал. При изменении потенциала катода происходит переключение пучка на соответствующий электрод.

Это свойство трохотрона может быть использовано для построения схемы амплитудного анализатора, показанной на рис. 64. В данной схеме входные импульсы подаются вначале на расширитель, которым служит пиковый детектор со сбросом, формирующий

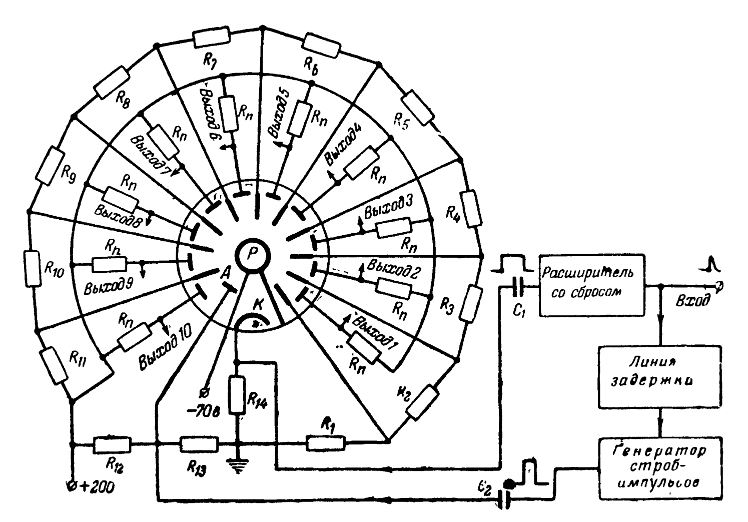


Рис. 64. Схема амплитудного анализатора на линейном трохотроне.

импульсы постоянной длительности в несколько микросекунд и передающий амплитуду импульса без искажений. Импульсы с расширителя подаются на катод трохотрона.

Все пластины трохотрона подключены через нагрузочные сопротивления к источнику питания. С этих сопротивлений снимаются импульсы, соответствующие определенным амплитудным уровням входных сигналов, и подаются на регистрирующие пересчетные устройства.

Лопатки трохотрона подключены к относительно низкоомному делителю. Уровни напряжений на лопатках повышаются по мере приближения к аноду трохотрона. Уровень напряжения на десятой лопатке должен быть настолько ниже уровня напряжения на аноде в момент действия на нем импульса «подсвета», чтобы в том случае, когда потенциал катода повысится приблизительно до уровня потенциала десятой лопатки, пучок не гасился за счет низкой разности потенциалов между анодом и катодом (с учетом действия импульса «подсвета»). Импульсы подсвета вырабатываются для гашения пучка на время переходных процессов. Эти импульсы, как условно показано на рис. 64 точками, задержаны на несколько десятых долей микросекунды относительно входных импульсов. По длительности

они короче анализируемых импульсов, подаваемых на катод, настолько, что кончаются раньше последних.

Максимальная амплитуда анализируемых импульсов должна быть приблизительно равна напряжению на десятой лопатке и устанавливается с помощью соответствующего усилителя на входе всей схемы.

Анализаторы, подобные описанному выше, находят широкое применение в физических исследованиях, а также при анализе статистических характеристик случайных процессов.

Аналогичная схема с некоторыми изменениями может быть использована в качестве генератора ступенчатого напряжения. Изменения эти заключаются в том, что на катод трохотрона подается пилообразное напряжение, вырабатываемое специальным генератором. Пластины трохотрона подсоединяются к источнику по такой же схеме, как и лопатки. В этом случае пучок в трохотроне по мере увеличения пилообразного напряжения будет перемещаться из пер-

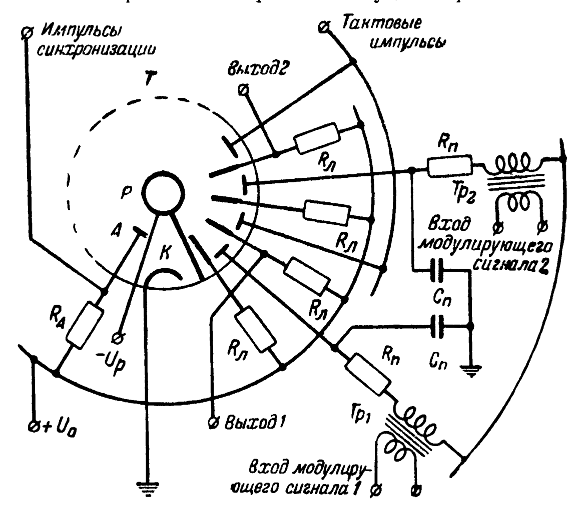


Рис. 65. Схема фазово-импульсного модулятора на линейном трохотроне.

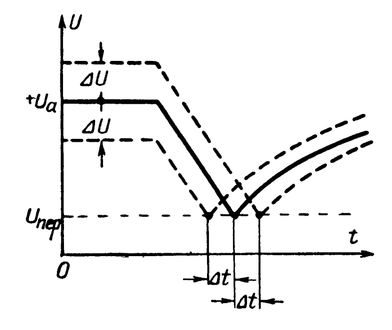


Рис. 66. Графики напряжения на одной из нечетных пластин.

вой камеры в десятую, а напряжение в точке съема будет расти скачками за счет того, что результирующие сопротивления в цепях пластин будут последовательно нарастать.

На рис. 65 показана схема фазово-импульсного модулятора на линейном трохотроне. Камеры трохотрона используются таким образом, что каждая пара входит в состав отдельного канала с фазово-импульсной модуляцией.

Сопротивления $R_п$ в цепях пластин нечетных камер выбираются достаточно большой величины с тем, чтобы при появлении пучка на одной из нечетных пластин напряжение на ней уменьшалось за счет падения напряжения на сопротивлении $R_п$ ниже потенциала переброса $U_{пер}$. Процесс уменьшения напряжения на этих пластинах затягивается включением дополнительных конденсаторов $C_п$. Сопротивления $R_п$ подключены к источнику питания $U_а$ через вторичные обмотки модуляторных трансформаторов Tp.

Таким образом, при поступлении пучка в одну из нечетных камер начальный потенциал на пластине может изменяться в пределах $U_а \pm \Delta U$, где ΔU — амплитудное значение медленно меняющегося модулирующего напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В зависимости от величины этого начального напряжения на пластинах момент переброса пучка может смещаться вдоль оси времени так, как это показано на рис. 66.

После переключения пучка в четную камеру пучок остается в ней заблокированным до тех пор, пока на пластину этой камеры не будет подан одиночный отрицательный тактовый импульс. При этом пучок перебросится в соседнюю нечетную камеру, а переброс из нее в соседнюю четную произойдет самостоятельно в момент времени, зависящий от напряжения на соответствующей вторичной обмотке.

Выходами модуляторов импульсов служат лопатки четных камер. С анода трохотрона снимаются импульсы синхронизации для управления генератором, вырабатывающим тактовые импульсы в приемном демодуляторном устройстве.

Описанная схема выполняет задачи коммутатора каналов и фазово-импульсной модуляции в каждом канале.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 25 коп.